

Gesamtausgabe zum Förderprojekt GalvanoFlex_BW

Stromoptimierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in der Galvanotechnikbranche

Gesamtausgabe mit den Beiträgen aus den Ausgaben WOMag 7-8/2019, 9/2019, 10/2019 und 12/2019 der Projektpartner des Förderprojekts GalvanoFlex_BW

WOMAG
Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche

WOMAG
Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche

WOMAG
Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche

WOMAG
Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche

WOMAG
Kompetenz in Werkstoff und funktioneller Oberfläche

HERZLICHEN DANK!

MUNK
WE HAVE THE POWER!

SPECIAL
Pro galvanisch Chrom – Positives Signal durch die Haragrohe Group

WERKSTOFFE
Spritzen von Metall-Harzstoff-Verbundschichten

WERKSTOFFE
Dichte- und reibungslose Spritzschichten

OBERFLÄCHEN
Stromoptimierte KWK in der Galvanotechnikbranche

OBERFLÄCHEN
Tribologisches Verhalten von Nickelschichten

WERKSTOFFE
Betrachtungen zum Vakuumhärten von Aluminium und Kupfer

WERKSTOFFE
Vorschau auf die DeburringExpo 2019

OBERFLÄCHEN
Reibverhalten von Dichtelastomeren auf galvanischen Oberflächen

OBERFLÄCHEN
Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken in Galvanikbetrieben

WERKSTOFFE
Hartmetallfräsen beim Miniaurisieren von Steckverbindern

WERKSTOFFE
Kupferwerkstoffe für elektrische Kontakte

OBERFLÄCHEN
Mit Plasma zum chromfreien Sonnenschutz

OBERFLÄCHEN
Korrosion und Korrosionsschutz

WERKSTOFFE
Passivieren von Silber mit organischen und metallischen Systemen

WERKSTOFFE
Materialkapselnungen bei Fahrwerksbauteilen

OBERFLÄCHEN
Produktion in engen Toleranzen durch RSA-Inline-Analyse

OBERFLÄCHEN
Online-Analyse zur Effizienzsteigerung am Beispiel Chemisch Nickel

DEZEMBER 2019

Branchen-News täglich: womag-online.de

**Stromoptimierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
in der Galvanotechnikbranche
Steigende Energieflexibilität
durch residuallast-angepasste KWK**

Von E. Köse, A. Sauer, B. Thomas, T. Müller, S. Kölle und P. Schwanzer

1

**Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken
in Galvanikbetrieben**

Von B. Thomas und T. Müller, Reutlinger Energiezentrum (REZ) – Hochschule Reutlingen

6

Energieeffizienz in der Galvanotechnik

Von Stefan Kölle, Peter Schwanzer, Christian Dierolf und Ekrem Köse, Stuttgart

9

**Die Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)
in Galvanikunternehmen – Treiber und Hemmnisse
aus sozialwissenschaftlicher Sicht**

Von Werner König, REZ Hochschule Reutlingen

14

≡ Stromoptimierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in der Galvanotechnikbranche

Steigende Energieflexibilität durch residuallast-angepasste KWK

Von E. Köse, A. Sauer, B. Thomas, T. Müller, S. Kölle und P. Schwanzer

Das Thema Energieflexibilität und Anpassung der eigenerzeugten Energie an die Energieerzeugung aus regenerativen Energien gewinnt an Bedeutung. Regulierbare Eigenerzeugungsanlagen können zur Stabilisierung des Netzes einen enormen Beitrag leisten. Dieser Aufsatz zeigt, welchen Effekt der Einsatz von BHKW auf die Galvanikbranche hat und wie nicht nur die eigenen Energiekosten reduziert, sondern auch die Möglichkeit geschaffen wird, auf Signale der Energiewirtschaft zu reagieren, ohne die Energieversorgung zu unterbrechen.

Power-optimized Combined Heat and Power for the electroplating industry – Respond to increasing energy flexibility through residual energy adapted combined heat and power plants

The subject of energy flexibility and adaptation of self-generated energy to energy production from renewable energies is becoming more important. Adjustable distributed power plants can have a huge impact for stabilizing the power grid. This article displays the effects of using combined heat and power on the electroplating industry. It demonstrates how energy costs can be reduced, and furthermore how the possibility can be created to respond to signals of the energy industry without interrupting the energy supply.

1 Einleitung und Überblick

Im Jahr 2017 wurden 36,1 % des verbrauchten Stroms von erneuerbaren Energien abgedeckt. Insbesondere der Anstieg an Windkraft konnte in den letzten Jahren ein enormes Wachstum verzeichnen. Diese Energien unterliegen allerdings einer gewissen Fluktuation, da die Verfügbarkeit nicht vollumfänglich vorhersehbar ist. Die Volatilität des deutschen Strommarktes an der EEX (EEX: European Energy Exchange) verzeichnete im Jahr 2017 so viele Negativpreisstunden wie noch nie [1]. Um den flexiblen Strommarkt zu unterstützen und gleichzeitig die Energiekosten von Unternehmen zu reduzieren, wird in diesem Beitrag eine residuallast-optimierte Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) für die Zeiten, in denen die regenerativen Energien den geringsten Deckungsbeitrag vom Energieverbrauch leisten oder in Zeiten einer Überdeckung abschalten, vorgestellt. Dabei wird die Energieversorgung der Unternehmen nicht unterbrochen.

Des Weiteren werden die Rahmenbedingungen der Energieflexibilität, der Stand der Forschung und die Notwendigkeit einer residuallast-angepassten Fahrweise von KWK erläutert. Schließlich wird die Funktionsweise eines residuallast-angepassten Blockheizkraftwerks (BHKW) beschrieben sowie das Anwendungsgebiet der Galvanikbranche nä-

her betrachtet; mögliche Potenziale werden angegeben und eine Einordnung der galvanischen Prozesse vollzogen. Abschließend werden der weitere Forschungsbedarf und ein Ausblick vorgestellt.

2 Energieflexibilität

Grundsätzlich können eine Stabilisierung des Netzes und die Gewährleistung der Versorgungssicherheit unter anderem durch die Abschaltung von regenerativen Anlagen oder durch den Bezug von Regelenergie sichergestellt werden. Die Abschaltung und auch die Nutzung von Regelenergie sind mit Kosten verbunden, die von den Übertragungsnetzbetreibern getragen und in die Netzentgelte eingepreist werden.

Die Vorhaltung von Sekundärregelenergie und Minutenreserven kostete die Übertragungsnetzbetreiber im Jahr 2016 etwa 123,8 Millionen Euro. Dabei betrug die eingesetzte Energiemenge etwa 1,4 TWh für positive Sekundärregelleistung und 0,7 TWh für negative Sekundärregelleistung. Die abgerufene Energiemenge für Minutenregelleistung lag in Summe bei einem Wert von 0,228 TWh. Die Redispatch-Maßnahmen – also die Erhöhung oder Reduzierung von Kraftwerken nach vertraglicher Vereinbarung – beliefen sich im selben Zeitraum auf 11,475 TWh beziehungsweise 220 Millio-

nen Euro. Das Abschalten von erneuerbaren Energien, Grubengas- und KWK-Anlagen wird Einspeisemanagement genannt. Nach dem Rekordjahr 2015, in dem 4,722 TWh abgeregelt wurden, ist die Ausfallarbeit im Jahr 2016 auf 3,743 TWh gesunken [2].

Tendenziell sind die Kosten für die Regulierung des Netzes gesunken. Die Regelung der Energieerzeugung und auch das Lastmanagement auf der Verbraucherseite werden mit einem weiteren Anstieg der erneuerbaren Energien jedoch weiter an Bedeutung gewinnen. Insgesamt gibt es vier Flexibilitätsoptionen:

- die *Regelung der Erzeugung* beziehungsweise der Wechsel des Energieträgers
- die *Regelung der Übertragung*
- die *Steuerung des Verbrauchs* und
- die *Speicherung von Energie* [3, 4].

Es gibt bereits Blockheizkraftwerke (BHKW), die entsprechend der Strompreise der Strombörse in Leipzig (EEX) ihre Leistung auf dieser Plattform verkaufen und somit ihren Gewinn aus dem Verkauf von Energie maximieren [5]. Erneuerbare Energien und KWK-Anlagen nehmen ebenfalls schon aktiv am Regelenergiemarkt teil. Untersuchungen haben ergeben, dass Blockheizkraftwerke in Wohn- und Nicht-Wohngebäuden einen wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des Netzes – auch im Hinblick auf die aus derzeitiger Sicht

OBERFLÄCHEN

zu erwartenden, zukünftige Ausbauszenarien – leisten können [6]. Diese Anlagen, die ihre Leistung entsprechend den Anforderungen aus dem Regelenergiemarkt hinauf oder herunter drosseln können, bieten die produzierte Energie im Gebäudemanagement oder mittels Elektroheizern an [6, 7].

Das Forschungsvorhaben *GalvanoFlex_BW* hat das Ziel, die Eigenenergieerzeugung eines produzierenden Unternehmens zu optimieren, indem der Wärme- und Stromverbrauch der Produktion durch die Energieerzeugung von einem Blockheizkraftwerk kostenoptimal gedeckt und zusätzlich die maximale Leistung zur Netzstabilisierung bereitgestellt wird. In diesem Beitrag wird der erste Schritt zur kostenoptimalen Erzeugung aufgezeigt. Durch die Maximierung des Eigenstromanteils und die Reduzierung der Spitzenlast – ohne dabei die Medienversorgung zu unterbrechen – wird der erste Teil des Forschungsvorhabens dargestellt.

3 Residuallast-angepasstes BHKW

Derzeit werden Blockheizkraftwerke meist wärmegeführt betrieben. Das bedeutet, dass mit dem Blockheizkraftwerk versucht wird, den Wärmebedarf eines Gebäudes soweit wie möglich abzudecken und den dabei generierten Strom je nach Situation ins Netz einzuspeisen oder dem Gebäude zur Verfügung zu stellen, wenn dort eine Nachfrage besteht. Dabei stellt der Eigenverbrauch jedoch die deutlich wirtschaftlichere Variante dar. Das soll nun bei einem stromoptimiert betriebenen Blockheizkraftwerk beachtet werden. Der primäre Fokus liegt dabei zwar immer noch auf der Deckung des Wärmebedarfs, allerdings wird die Flexibilität des Pufferspeichers genutzt, um das Blockheizkraftwerk nach Möglichkeit immer dann zu betreiben, wenn ein erhöhter Strombedarf vorliegt.

In einem im Rahmen von *BWplus* geförderten Vorprojekt (Stromoptimierter Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wärmespeichermanagement, 2016 [8]) ist am Reutlinger Energiezentrum (REZ) der Hochschule Reutlingen ein Modell entwickelt worden, mit dessen Hilfe die stromoptimierte Betriebsweise von Blockheizkraftwerken simuliert werden kann. Inhalt des Projekts *GalvanoFlex_BW* ist es nun, dieses Modell weiter zu entwickeln und an die Gegebenheiten von Industriebetrieben anzupassen. Die Funktionsweise des Modells soll an dieser Stelle nur kurz erläutert werden. Genauere Details sind dem Abschlussbericht zum oben genann-

ten Projekt sowie einer daraus entstandenen Veröffentlichung zu entnehmen [9].

3.1 Simulation in GalvanoFlex_BW

Eingangsgröße für die Fahrplanoptimierung des Blockheizkraftwerks ist eine Prognose für den kumulierten Wärmebedarf über die 24 Stunden des Folgetags. Wird zu der so entstehenden Wärmebedarfskurve die thermische Kapazität des Wärmespeichers addiert, so ergibt sich eine zweite, obere Wärmebedarfskurve, die parallel zur Ausgangs- oder unteren Wärmebedarfskurve verläuft. Zwischen diesen beiden Kurven befindet sich das sogenannte Flexibilitätsband, in dem das Blockheizkraftwerk einzig unter Berücksichtigung der Belange des Blockheizkraftwerks selbst beliebig ein- oder ausgeschaltet werden kann. Unter dieser Randbedingung werden in diesem Bereich eine hohe Anzahl Fahrpläne nach dem Monte-Carlo-Verfahren erzeugt. Dabei wird in festen Zeitabständen per Zufall entschieden, ob das Blockheizkraftwerk ein- oder ausgeschaltet sein soll.

Als Randbedingungen im Hinblick auf die zuvor genannten Belange des Blockheizkraftwerks werden die Mindestlaufzeiten und Mindeststillstandzeiten für das Blockheizkraftwerk definiert, die eingehalten werden müssen. Ebenso muss der Fahrplan in jedem Fall im Bereich zwischen den beiden Wärmebedarfskurven verlaufen. Anschließend werden alle mit Hilfe des Monte-Carlo-Verfahrens generierten Fahrpläne hinsichtlich der erzielten Eigenstromdeckung auf Basis des Stromlastgangs ausgewertet.

Aus einer Untermenge der besten Fahrpläne wird dann derjenige ausgewählt, bei dem das Blockheizkraftwerk die wenigsten Starts aufweist. Weniger Starts erhöhen den Gesamtwirkungsgrad des Blockheizkraftwerks und wirken sich positiv auf die Lebensdauer aus. Die Simulation wird in Matlab/Simulink ausgeführt und sie dient der Verifizierung und Optimierung der Steuerungsalgorithmik. Im Anschluss daran, das heißt nach erfolgreichem Abschluss dieser Arbeiten, kann der Algorithmus auf die Steuerung des Blockheizkraftwerks portiert und in der Praxis getestet werden.

Letztendlich ist das Ergebnis jedoch von der Prognose der Strom- und Wärmelastgänge im jeweiligen Versorgungsobjekt abhängig. Je besser diese Prognosen sind, desto genauer sind die erstellten Fahrpläne und desto eher lässt sich damit die Eigenverbrauchrate erhöhen.

4 Galvanotechnikbranche als mögliches Einsatzfeld

Für die Etablierung von KWK-Anlagen in Unternehmen und im Privatsektor ist es wichtig, dass ein gewisser Wärmebedarf innerhalb des Bilanzrahmens vorliegt oder die entstehende Wärme in ein Fern- oder Nahwärmenetz abgeführt werden kann. Der Einsatz von KWK-Anlagen bietet sich insbesondere an, wenn nicht nur die erzeugte Wärme, sondern auch der parallel erzeugte Strom genutzt werden können. Die durchgeführte volkswirtschaftliche Betrachtung bezieht sich auf ein Szenario mit Wärmesenke innerhalb des Unternehmens.

Mittelgroße Galvanikunternehmen mit 70 bis 100 Mitarbeitern haben einen typischen Energieverbrauch in Form von Strom und Wärme zwischen 5.000 MWh und 10.000 MWh. Dabei verteilt sich der Energieverbrauch von Galvanikbetrieben im Durchschnitt auf 60 % Strom und 40 % Wärme. Der Anteil der Energiekosten kann zwischen 7 % und 20 % variieren. Der Anteil hängt insbesondere vom eingesetzten Verfahren ab [10]. Details hierzu werden in *Abschnitt 4.1* näher beschrieben.

Blockheizkraftwerke erreichen eine Vorlauftemperatur von bis zu 105 °C und bieten sich daher für Galvanikbetriebe an. Die meisten galvanischen Prozesse werden zwischen 0 °C (Verfahren der Hartanodisation (Schicht wird als Harteloxal bezeichnet)) und 90 °C (chemische Abscheidung von Nickel) betrieben. Neben dem Temperaturniveau ist ein weiterer wichtiger Faktor bei der Auswahl der KWK-Anlage das benötigte Verbrauchsverhältnis von Wärme und Strom.

Zur Beschreibung der Eignung eines Blockheizkraftwerks wird die Stromkennzahl S berechnet ($Gl. <1>$) [11].

$$S = P_{el} / Q_{Nutz} \quad <1>$$

Hierfür werden die elektrische Nutzleistung P_{el} und die thermische Nutzleistung Q_{Nutz} ins Verhältnis gesetzt. Blockheizkraftwerke können so je nach eingesetztem Antriebsmotor und Energiequelle eine Stromkennzahl zwischen 0,3 und 1,1 vorweisen [12]. Die durchschnittliche Verteilung von 60 % Strom und 40 % Wärme entspricht einer Stromkennzahl von 1,5. Da die Stromkennzahl von Galvanikbetrieben größer ist, als die eines Blockheizkraftwerks, bedeutet das, dass der Strombedarf nicht vollumfänglich abgedeckt werden kann und somit zusätzlich Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Diese Flexibilität wird innerhalb dieses Forschungsvorhabens genutzt, um das Netz durch Abschalten

des Blockheizkraftwerks in den Zeiten zu belasten, in denen zu viel regenerativer Strom im Netz ist und das Netz durch das Einschalten des Blockheizkraftwerks in den Zeiten zu stabilisieren, in denen eine hohe Residuallast vorliegt.

Die Galvanikbranche in Deutschland besteht in etwa aus 1500 industriellen Lohn- und Betriebsgalvaniken [13]. Mit dem oben genannten gemittelten Energieverbrauch hat diese Branche einen Energieverbrauch von etwa 11,25 °TWh (6,75 °TWh_{el} und 4,5 TWh_{th} (el = elektrische Energie, th = thermische Energie). Die erzielbaren Effekte durch den Einsatz eines Blockheizkraftwerks für Galvanikbetriebe in Deutschland können aus *Tabelle 1* entnommen werden.

Bei einem reinen wärmegeführten Betrieb und einer Stromkennzahl von 1,1 könnten 4,95 TWh_{el} durch Blockheizkraftwerke in Unternehmen erzeugt werden, die restlichen 1,8 TWh_{el} müssten aus dem Netz bezogen werden. Die hier angenommenen spezifischen Kohlenstoffdioxidemissionen für das Blockheizkraftwerk stellen einen Mittelwert aus unterschiedlichen Blockheizkraftwerken mit unterschiedlicher Stromkennzahl und Energieträgern dar. Diese gekoppelte Strom- und Wärmebereitstellung würde gegenüber einer getrennten Erzeugung zu einer Einsparung an erzeugtem Kohlenstoffdioxid und Primärenergie von zirka 5920 t CO₂ und 11,87 TWh führen [11, 14–16]. Auf Deutschland bezogen, das pro Jahr etwa 3756 °TWh Energie verbraucht [17], könnten auf diese Weise ungefähr 0,3 % des Primärenergieverbrauchs eingespart werden.

4.1 Einordnung der galvanischen Verfahren

Die hohen Energiekostenanteile der Branche sind auf das Grundprinzip der Galvanotechnik zurückzuführen. Die Schichtabscheidung erfolgt elektrochemisch aus meist wässrigen Metallsalzlösungen, den Elektrolyten. Durch das Anlegen eines elektrischen Gleichstroms werden Metallionen aus den Elektrolyten am Bauteil reduziert und bilden dadurch eine schützende Schicht. Zur elektrischen Energie zur Metallabscheidung kommt der Energiebedarf für die Temperierung der Prozess. Die meisten Verfahren, wie beispielsweise das Vernickeln oder das Verzinken, arbeiten bei Temperaturen zwischen 20 °C und 60 °C [18]. Dem Beschichtungsprozess sind Vorbehandlungsschritte zur Reinigung der Bauteile vorgeschaltet, die meist bei Temperaturen zwischen 40 °C und 60 °C betrieben werden

Tab. 1: Einsparungen eines Blockheizkraftwerks (BHKW) gegenüber konventioneller Erzeugung

	Netz + Gaskessel	BHKW	Differenz
Elektr. Endenergieverbrauch (Netzbezug)	6,75 TWh _{el}	1,80 TWh _{el}	4,95 TWh _{el}
Elektr. Eigenerzeugung (BHKW)	-	4,95 TWh _{el}	-4,95 TWh _{el}
Therm. Endenergieverbrauch	4,50 TWh _{th}	4,50 TWh _{th}	0,00 TWh _{th}
Summe	11,25 TWh _{el+th}	11,25 TWh _{el+th}	0,00 TWh _{el+th}
Primärenergieeinsatz zur Stromproduktion (Netz)	15,84 TWh	4,23 TWh	11,61 TWh
Primärenergieeinsatz zur Wärmeproduktion (Kessel)	5,00 TWh	0,00 TWh	5,00 TWh
Primärenergieeinsatz gekoppelt (BHKW)	-	4,74 TWh	-4,74 TWh
Summe Primärenergie	20,84 TWh	8,97 TWh	11,87 TWh
CO ₂ -Emissionen	9354 t	3438 t	5920 t

Wirkungsgrad: Stromnetz: 42,6 % [14]; Gaskessel: 90,0 % [15]; BHKW: 95,0 % [11]

Spezifische CO₂-Emissionen: Stromnetz: 527 g CO₂/kWh [16]; Gaskessel: 202 g CO₂/kWh [15];

BHKW: 255 g CO₂/kWh [15]

und den Wärmebedarf mitbestimmen [18]. Je nach Verfahren können thermische Nachbehandlungsprozesse notwendig sein. Der Energieverbrauch erweitert sich durch verschiedene Komponenten von galvanotechnischen Anlagen, zum Beispiel Umwälzpumpen, Absaugung, Trockner oder Antriebe.

Eine Studie des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz [10] ermittelte für einen ausgewählten Betrieb folgende Hauptverbraucher:

- Gleichrichter: 32 %
- Beheizung der Prozesse: 23 % (inkl. Vor- und Nachbehandlung)
- Raumbeheizung: 28 %
- elektrische Antriebe: 12 %

Daraus ergibt sich eine ungefähre Aufteilung von 60 % elektrischem und 40 % thermischem Energieverbrauch, die, wie bereits dargelegt, sehr günstig für den Betrieb der Kraft-Wärme-Kopplung ist. Die genauen Anteile sind jedoch stark von den jeweiligen Beschichtungsverfahren abhängig. Im Folgenden wird ein Überblick über die Energieintensität verschiedener galvanischer Prozesse gegeben.

Einen besonders hohen Energiebedarf besitzen die Verfahren Hartverchromung und Harteloxieren. Der elektrische Energiebedarf ergibt sich maßgeblich aus dem Produkt aus Strom und Spannung. Bei der Hartverchromung wird mit hohen Stromdichten zwischen 20 A/dm² und 100 A/dm² und den sich daraus ergebenden Spannungen zwischen etwa 8 V und 5 V gearbeitet [19]. Ein erheblicher Teil der elektrischen Energie wird während der Abscheidung in Wärme umgesetzt, die durch Kühlung abgeführt werden muss. Beim Harteloxieren werden sehr hohe Spannungen bis zu 100 V, bei Stromdichten zwischen üblicherweise 2 A/dm² und 5 A/dm² benötigt.

Der Elektrolyt muss auf rund 0 °C gekühlt werden, um die typischen Eigenschaften von Harteloxalschichten gewährleisten zu können [18]. Wie auch bei der Hartverchromung muss der Prozess stark gekühlt werden, da bis zu 70 % der über die Gleichrichter eingetragenen Energie als Joulesche Wärme wieder abgeführt werden muss [20, 21].

Einen sehr hohen thermischen Energieverbrauch besitzt zudem die chemische Vernicklung, ein autokatalytischer Prozess, der für eine wirtschaftliche Abscheidungs geschwindigkeit bei Temperaturen um 90 °C betrieben werden muss [18]. Für diese drei Verfahren erscheint der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung besonders lohnenswert, da sich durch den Umstieg auf eine gekoppelte Erzeugung besonders große Einsparungen im Vergleich zum netzseitigen Energiebezug ergeben.

Weitere galvanotechnische Verfahren wie das Verzinken, Verkupfern oder Vernickeln, bei denen moderate Temperaturen und vergleichsweise niedrige Stromdichten vorliegen [18] haben einen geringeren flächenbezogenen Energieverbrauch. Der Betrieb von KWK-Anlagen kann trotzdem sinnvoll sein, da, wie bereits dargelegt, das Verhältnis aus Strom- und Wärmebedarf sehr günstig ist.

Der Strombedarf unterliegt größeren Schwankungen als der Wärmebedarf. Deshalb empfiehlt sich die Entwicklung einer stromoptimierten, flexiblen und damit residuallastangepassten Kraft-Wärme-Kopplung.

4.2 Stromoptimierte BHKW in der Galvanik

Um einen Einblick in die Vorteilhaftigkeit des stromoptimierten Betriebs eines Blockheizkraftwerks in der Galvanotechnik zu bekommen, sollen an dieser Stelle erste Ergebnisse vorgestellt werden. Untersucht wurde dabei

OBERFLÄCHEN

ein Galvanikbetrieb, bei dem der Jahreswärmebedarf den Jahresstrombedarf um etwa das Dreifache übersteigt. Eine daraus folgende Energiekosteneinsparung bezieht sich auf die Option, Strom und Wärme getrennt zu erzeugen, das heißt, Strom aus dem Netz zu beziehen und Wärme im Gaskessel zu erzeugen. Für die Betrachtung werden durchschnittliche Industriepreise für Strom und Gas in Höhe von 17,2 ct/kWh_{el} (nach BDEW) und 4,5 ct/kWh (Hs) (aus: statista) angesetzt. Für das Blockheizkraftwerk sind Stromerlöse nach Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG), Gaskosten sowie Kosten für Wartung und Instandhaltung hinterlegt; Kapitalkosten sind dagegen nicht enthalten.

Abbildung 1 zeigt die jährlichen Energiekosteneinsparungen für fünf Blockheizkraftwerke unterschiedlicher Leistung. Für jedes wurde der Pufferspeicher dabei so ausgelegt, dass das Verhältnis von Pufferspeichervolumen zu thermischer Leistung des Blockheizkraftwerks gleich ist. Jedes Blockheizkraftwerk wurde sowohl wärmegeführt als auch stromoptimiert simuliert. Im stromoptimierten Betrieb wurde zusätzlich die Variante untersucht, bei der neben der Eigenstromdeckung die Senkung der elektrischen Lastspitze ein weiteres Optimierungskriterium darstellt.

Zu sehen ist nun zum einen, dass die Einsparungen mit zunehmender Größe des Blockheizkraftwerks ansteigen. Zum anderen ist zu erkennen, dass der stromoptimierte Betrieb, gerade bei den größeren Blockheizkraftwerken, die weniger Stunden im Jahr betrieben werden und somit bei der Optimierung flexibler sind, einen kleinen Vorteil gegenüber dem wärmegeführten Betrieb aufweist. Verstärkt wird dieser Vorteil durch das Lastspitzenmanagement.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Vorteilhaftigkeit von stromoptimiertem Betrieb

und Lastspitzenmanagement stark vom Profil der Jahresdauerlinie des Stromverbrauchs abhängt. Bei ausgeprägten Stromspitzen treten die Vorteile folglich deutlicher zu Tage. Dieser Aspekt wird in einem Folgeartikel aufgegriffen und ausführlicher diskutiert.

Um die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Blockheizkraftwerke in der Galvanotechnik in anderer Weise zu verdeutlichen, ist in *Abbildung 2* der interne Zinsfuß dargestellt, der sich für jede Variante über 60 000 Betriebsstunden und damit über den Zeitraum bis zur ersten Generalüberholung des Blockheizkraftwerks ergibt. Berücksichtigt wurden dabei eine jährliche Steigerung der Energiepreise von 3 % sowie eine allgemeine Preissteigerung von 1 %.

Neben den zuvor erläuterten Kosten und Erträgen ist hier die Abschreibung des Blockheizkraftwerks jeweils eingerechnet. Es zeigt sich, dass der interne Zinsfuß bei den kleineren Anlagen trotz der geringeren absoluten Energiekosteneinsparungen deutlich besser ist, als bei den größeren. Ursächlich verantwortlich für diese Abhängigkeit sind die Investitionskosten, die mit der Leistung des Blockheizkraftwerks ansteigen. Mit Blick auf die erreichten Werte ist abzulesen, dass mit dem Blockheizkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 50 kW unter Einbeziehung des Lastspitzenmanagements ein interner Zinsfuß von über 30 % erreicht werden kann. Dieser Wert untermauert eindrücklich die generelle Vorteilhaftigkeit des Einsatzes von Blockheizkraftwerken in dem betrachteten Galvanikbetrieb. Zudem weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die stromoptimierte Betriebsweise sowie das Lastspitzenmanagement diesen Effekt gegenüber der klassischen wärmegeführten Betriebsweise noch einmal verstärken können.

Inwieweit sich diese Aussage verallgemeinern und auf andere Betriebe übertragen

lässt, soll ebenfalls in einem Folgeartikel erörtert werden. Es kann jedoch bereits vorweggenommen werden, dass bei geeigneter Auslegung nahezu in jeder Anwendung ein wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden kann, der lediglich bei sehr geringem jährlichen Wärmebedarf verschwindet, was in der Natur der Sache liegt, da Blockheizkraftwerke zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme eingesetzt werden und damit ihre Wirkung erst bei ausreichendem Wärmebedarf vollständig entfalten können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Aufsatz wurde aufgezeigt, wieso eine Interaktion mit dem flexiblen Energiemarkt notwendig und insbesondere für die Zukunft relevant ist. Zudem wurde dargelegt, welche Einflüsse die Integration von Blockheizkraftwerken in der galvanotechnischen Industrie hat und welche Vorteile dadurch nicht nur für das einzelne Unternehmen, sondern für die gesamte Industrie, erzielt werden können. Der Betrieb von Blockheizkraftwerken ermöglicht bereits jetzt Einsparungen für die einzelnen Unternehmen. Zukünftig, das heißt, mit steigenden Anteilen von volatilem Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen wird die Energieflexibilität von Blockheizkraftwerken weiter an Bedeutung gewinnen. Dem entsprechend sind die hier entwickelten optimalen Betriebsweisen für Blockheizkraftwerke gut geeignet, den bereits bestehenden wirtschaftlichen Vorteil zu verstärken.

Literatur

- [1] Agora Energiewende: Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2018 (2018); online verfügbar unter: www.agora-energie-wende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung_2017/Agora_Jahresauswertung-2017.pdf

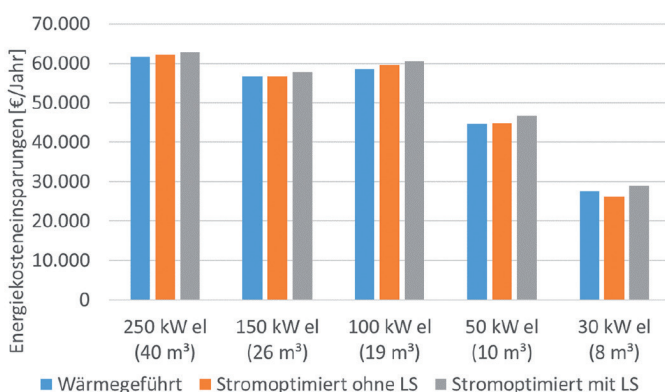


Abb. 1: Mit Blockheizkraftwerk erreichbare Energiekosteneinsparungen in einem Galvanikbetrieb bei unterschiedlichen Betriebsweisen

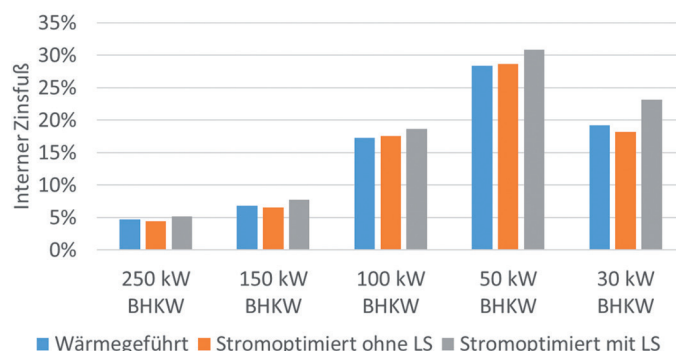


Abb. 2: Interner Zinsfuß für die betrachteten BHKW über einen Zeitraum von 60.000 Betriebsstunden

- [2] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekom-
munikation, Post und Eisenbahnen (2017): Moni-
toringbericht 2017; online verfügbar unter: [https://
www.hannover.ihk.de/fileadmin/data/Dokumente/
Themen/Energie/Monitoringbericht_2017.pdf](https://www.hannover.ihk.de/fileadmin/data/Dokumente/Themen/Energie/Monitoringbericht_2017.pdf)
- [3] M. Metz: Flexible Energieversorgung. Modellierung
der Last- und Erzeugungssituation dezentraler Ver-
sorgungsgebiete zur Bestimmung der Systemflexi-
bilität; Dissertation, TU Dortmund (2013)
- [4] E. Köse, A. Sauer, C. Pelzel: Energieflexibel durch bi-
valente Produktionsanlagen; in: wt Werkstatttech-
nik online (2017); 107:366-372
- [5] Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. / bo-
fest consult GmbH: Kurzstudie – Beitrag von zen-
tralen und dezentralen KWK-Anlagen zur Netzzun-
terstützung (2014); online verfügbar unter: [https://
www.bkww.de/fileadmin/users/bkww/infos/studien/
bc_BKWK_Beitrag_von_zentralen_und_dezentralen_
KWK-Anlagen_zur_Netzstuetzung_FINAL.pdf](https://www.bkww.de/fileadmin/users/bkww/infos/studien/bc_BKWK_Beitrag_von_zentralen_und_dezentralen_KWK-Anlagen_zur_Netzstuetzung_FINAL.pdf)
- [6] Forschungsverbund Erneuerbare Energien: Regel-
leistung aus Blockheizkraftwerken – Treiber, Poten-
ziale und Hemmnisse (2013); online verfügbar unter:
[http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/
Themenhefte/th2013-2/th2013_06_03.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2013-2/th2013_06_03.pdf)
- [7] VDI-Berichte 2212, Optimierung in der Energie-
wirtschaft: Einsatz von BHKW mit Wärmespeicher
im virtuellen Regelenergiekraftwerk – Modellie-
rung der Regelenergiebereitstellung bei komplexen
Energiesystemen mit intertemporalen Restriktion-
en (2013); online verfügbar unter: [https://www.
energietechnik.tu-berlin.de/fileadmin/fg106/
Dateien/Mitarbeiter/2013_Spieker_-_BHKW_im_
virtuellen_Regelenergiekraftwerk_VDI-Berich-
te_2212.pdf](https://www.energietechnik.tu-berlin.de/fileadmin/fg106/Dateien/Mitarbeiter/2013_Spieker_-_BHKW_im_virtuellen_Regelenergiekraftwerk_VDI-Berichte_2212.pdf)
- [8] D. Lödige, B. Thomas, C. Widmann: Stromoptimierter
Betrieb von KWK-Anlagen durch intelligentes Wär-
mespeichermanagement; Abschlussbericht (2016)
- [9] C. Widmann, D. Lödige, A. Toradmal, B. Thomas: En-
abling CHP units for electricity production on de-
mand by smart management of the thermal ener-
gy storage; Applied Thermal Engineering 114 (2017),
S.1487-1497
- [10] Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Ef-
fiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie;
Augsburg (2003)
- [11] Richard A. Zahoransky: Energietechnik – Systeme
zur Energieumwandlung; Kompaktwissen für Studi-
um und Beruf; 4. aktualisierte und erweiterte Auf-
lage (2009); ISBN 978-3-8348-0488-4
- [12] BINE Informationsdienst: Kraft und Wärme koppeln
(2006); online verfügbar unter: [http://www.bine.info/
fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/
Basis_Energie_Nr._21/basis21internetx.pdf](http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Basis_Energie/Basis_Energie_Nr._21/basis21internetx.pdf)
- [13] Institut für Ökologie und Politik GmbH (o.J.): Bran-
chenanalyse der deutschen Galvano- und Oberflä-
chentechnik; online verfügbar unter: [http://www.
reach-helpdesk.info/fileadmin/reach/dokumente/
Anhang01Branchenanalyse.pdf](http://www.reach-helpdesk.info/fileadmin/reach/dokumente/Anhang01Branchenanalyse.pdf)
- [14] Umweltbundesamt: Konventionelle Kraftwerke und
erneuerbare Energien (2018); online verfügbar un-
ter: [https://www.umweltbundesamt.de/daten/
energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-
energien#textpart-5](https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/konventionelle-kraftwerke-erneuerbare-energien#textpart-5)
- [15] Öko-Institut e.V.: Aktueller Stand der KWK-Erzeu-
gung (Dezember 2015); online verfügbar unter:
www.oeko.de/oekodoc/2450/2015-607-de.pdf
- [16] Umweltbundesamt: Entwicklung des Primärener-
gieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern
mit politischen Zielen (2018); online verfügbar un-
ter: [https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/
primaerenergieverbrauch#textpart-2](https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch#textpart-2)
- [17] Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Ener-
gieträgern, Sektoren und Anwendungen (2018). on-
line verfügbar unter: [www.umweltbundesamt.de/
daten/energie/energieverbrauch-nach-energietrae-
gern-sektoren](http://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraeger-sektoren)
- [18] Thomas W. Jelinek: Praktische Galvanotechnik; Ein
Lehr- und Handbuch; 5. erweiterte und neu überar-
beitete Auflage (1997), Leuze Verlag, Saulgau/Württ.
- [19] Günther A. Lausmann, Jürgen N. M. Unruh: Die gal-
vanische Verchromung; 2., komplett überarbeitete
Auflage (2006), Leuze Verlag, Bad Saulgau
- [20] St. Kölle, K. Schmid, M. Metzner, Christian Mock: Das
ÖKOXAL-Verfahren: Verbesserte Energieausbeute
beim Hartanodisieren; in: Alexander Michaelis (Hg.):
Symposium: Anodisieren – Oxidschichten von hart
bis smart; Dresden, 24.-25. November 2016; Fraun-
hofer IKTS, Stuttgart: Fraunhofer Verlag
- [21] St. Kölle, K. Schmid, Chr. Mock: Neue Erkenntnisse
beim Hartanodisieren – Muss der Elektrolyt auf 0 °C
gekühlt werden?; WOMag 11/2015; online verfü-
gbar unter: [https://www.wotech-technical-media.de/
womag/ausgabe/2015/11/23_koelle_alu_11j2015/
23_koelle_alu_11j2015.php](https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2015/11/23_koelle_alu_11j2015/23_koelle_alu_11j2015.php)

Zu den Autoren

M. Sc. Ekrem Köse, Prof. Dr. Alexander Sauer
Universität Stuttgart, Institut für Energieeffizienz in der
Produktion, Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart;
E-Mail: ekrem.koese@eep.uni-stuttgart.de
E-Mail: alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
➔ www.eep.uni-stuttgart.de/

Prof. Dr. Bernd Thomas, M. Sc. Tobias Müller
Reutlingen Research Institute, Hochschule Reutlingen,
Alteburgstraße 150, D-72762 Reutlingen;
E-Mail: bernd.thomas@reutlingen-university.de
E-Mail: tobias.mueller@reutlingen-university.de
➔ [www.reutlingen-university.de/de/forschung/
lehr-und-forschungszentren/reutlinger-ener-
giezentrum/](http://www.reutlingen-university.de/de/forschung/lehr-und-forschungszentren/reutlinger-energiezentrum/)

Dr.-Ing. Stefan Kölle, Dipl.-Ing. Peter Schwanzler
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automa-
tisierung IPA, Nobelstraße 12, D-70569 Stuttgart;
E-Mail: stefan.koelle@ipa.fhg.de
E-Mail: peter.schwanzler@ipa.fhg.de
➔ www.ipa.fraunhofer.de

Hinweis

Erstveröffentlichung des vorliegenden Bei-
trags erfolgte in: wt Werkstattstechnik online,
Jahrgang 108 (2018) H. 7/8

Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken in Galvanikbetrieben

Von B. Thomas und T. Müller, Reutlinger Energiezentrum (REZ) – Hochschule Reutlingen

Am Beispiel von zwei Unternehmen mit stark unterschiedlichen Strom- und Wärmebedarfswerten zeigt sich, dass aufgrund einer Amortisationszeit im günstigsten Fall von etwa zwei Jahren der Einsatz von Blockheizkraftwerken in jedem Fall wirtschaftlich lohnenswert ist. Dabei wird deutlich, dass die Auslegung des Blockheizkraftwerks stark von den Strom- und Wärmebedarfswerten abhängt und dass der Pufferspeicher keinesfalls zu klein ausgelegt werden sollte. Das gute wirtschaftliche Ergebnis gilt bereits für den standardmäßig eingesetzten wärmegeführten Betrieb des Blockheizkraftwerks, wobei eine intelligente stromoptimierte Steuerung mit Lastspitzenmanagement die Wirtschaftlichkeit weiter verbessert. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass Blockheizkraftwerke auf einen längerfristigen Betrieb ausgelegt sind. Bei jährlichen Betriebszeiten von 4000 Stunden bis 8000 Stunden ergibt sich ein Betrieb des Blockheizkraftwerks über sechs bis zwölf Jahre.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projekts *GalvanoFlex_BW* beschäftigt sich das Reutlinger Energiezentrum (REZ) der Hochschule Reutlingen mit Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken (BHKW) in Industriebetrieben im Allgemeinen, wobei der Einsatz von BHKW in der Galvanikbranche im Vordergrund steht.

Zu diesem Zweck wird ein eigens entwickeltes, auf Matlab-Simulink basierendes Simulationsmodell genutzt, mit dem der Betrieb von Blockheizkraftwerken auf Basis der jeweiligen Strom- und Wärmelastprofile in hoher zeitlicher Auflösung über ein komplettes Jahr berechnet werden kann. Das Stromlastprofil kann dabei zumeist aus der registrierenden Leistungsmessung (RLM) des Energieversorgers in ¼-Stundenauflösung entnommen werden. Die Vorgabe des Wärmelastprofils gestaltet sich dagegen schwieriger, da häufig keine entsprechenden Messwerte vorliegen. In diesem Fall muss auf Standardlastprofile ausgewichen werden, die beispielsweise beim BDEW für verschiedene Branchen verfügbar sind [1].

Im Zuge des Forschungsprojekts konnte der Wärmebedarf in einem Galvanikbetrieb über den Zeitraum von zwei Wochen in hoher Auflösung gemessen werden, und aus diesen Daten ist unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankung der Außentemperatur ein Jahreswärmelastprofil erstellt worden, das den nachfolgend dargestellten Wirtschaftlichkeitsrechnungen zugrunde liegt.

Das zuvor erwähnte Simulationsmodell bietet außerdem die Möglichkeit, den Betrieb eines Blockheizkraftwerks nicht nur wärmegeführt zu berechnen, sondern auch strom-

optimiert unter spezieller Berücksichtigung der Deckung von elektrischen Lastspitzen. Zu diesem Zweck wird der in einer Blockheizkraftwerk-Anlage ohnehin erforderliche Wärmespeicher gezielt genutzt, um die Betriebszeit des Blockheizkraftwerks in die Phasen zu verschieben, in denen hoher Strombedarf im Unternehmen oder gar eine elektrische Lastspitze vorliegen. So kann sowohl die vom Blockheizkraftwerk erzeugte Wärme nach wie vor vollständig genutzt als auch der externe Strombezug sowie die jährliche Leistungsspitze gesenkt werden. Letzteres erhöht die Wirtschaftlichkeit gegenüber dem wärmegeführten Betrieb, der derzeit mangels geeigneter intelligenter Steuerungsalgorithmen noch den Standardbetriebsfall für Blockheizkraftwerke darstellt.

2 Methodik

Wie eingangs erwähnt, werden mit Hilfe des Simulationsmodells Berechnungen zum Betrieb eines Blockheizkraftwerks in einem Industriebetrieb über ein komplettes Jahr durchgeführt. Dieser Betrachtungszeitraum ist erforderlich, um die jahreszeitlichen Schwankungen des Wärmebedarfs zur Raumheizung adäquat zu erfassen. Aus der Simulation ergeben sich die jährliche Anzahl Betriebsstunden für das Blockheizkraftwerk sowie die von ihm erzeugten Mengen an elektrischem Strom und Wärme. Aufgrund der zeitaufgelösten Berechnung kann zudem angegeben werden, welche Menge an erzeugtem Strom aufgrund der Gleichzeitigkeit mit dem Verbrauch direkt im Unternehmen verwendet werden kann. Zudem ergibt sich auf diese Weise die verbleibende Spitze der elektrischen Bezugsleistung. Beide Infor-

mationen sind wichtig für die nachgelagerte Wirtschaftlichkeitsberechnung des Blockheizkraftwerks, und es ist offensichtlich, dass eine genaue Angabe dieser Werte nur mit Hilfe einer zeitaufgelösten Berechnung möglich ist. Einfache, pauschale Berechnungsmethoden sind dafür nicht geeignet.

Wie angedeutet, erfolgt die Berechnung der Wirtschaftlichkeit nachgelagert, in dem die jeweiligen Energiemengen mit den zugehörigen Tarifen verrechnet werden. Als Vergleichsmaßstab dient der Ausgangszustand, nach dem der benötigte elektrische Strom aus dem Netz bezogen wird und die benötigte Wärme mit Hilfe von Gasbrennern beziehungsweise -kesseln bereitgestellt wird. Dabei werden ein durchschnittlicher Industriestrompreis von 18,44 ct/kWh_{el} (nach BDEW für 2019 [2]) sowie ein Leistungspreis von 97,7 €/kW_{el} zugrunde gelegt. Der Tarif für das bezogene Erdgas wird auf einen Preis von 2,82 ct/kWh(Hs) (aus statista für Industriebetriebe 2019 [3]) festgelegt.

Die Vergütungen für den vom Blockheizkraftwerk erzeugten Strom werden nach dem aktuellen KWK-Gesetz geregelt. Demnach erhält man für den selbstverbrauchten Strom aus einem Blockheizkraftwerk einen sogenannten KWK-Zuschlag. Dieser beträgt 4 ct/kWh_{el} für Blockheizkraftwerke unterhalb 50 kW elektrischer Leistung. Für die Leistung zwischen 50 und 100 kW_{el} beträgt der Zuschlag 3 ct/kWh_{el}, und für Anlagen oberhalb von 100 kW elektrischer Leistung entfällt der Zuschlag. Zudem müssen für den selbstverbrauchten Strom 40 % der EEG-Umlage abgeführt werden, sofern das Blockheizkraftwerk vom Unternehmen betrieben wird. Erfolgt der Betrieb im Contracting, fällt

die EEG-Umlage komplett an. Für Strom aus einem Blockheizkraftwerk, der in das Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist wird, wird ebenfalls ein KWK-Zuschlag gezahlt, der doppelt so hoch ist wie im Falle von selbstverbrauchtem Strom und der auch für Blockheizkraftwerke oberhalb einer Leistung von 100 kW_{el} anfällt, allerdings in mit der Leistung abnehmender Höhe. Zusätzlich wird der eingespeiste Strom mit dem sogenannten üblichen Preis vergütet, der quartalsweise an der Strombörse festgelegt wird und aktuell 3,58 ct/kWh_{el} beträgt. Außerdem wird das vermiedene Netzentgelt erstattet; dieser Betrag ist allerdings gering und liegt im Bereich von etwa 0,5 ct/kWh_{el}. Für den Brennstoff, der in Blockheizkraftwerken umgesetzt wird, entfällt zudem anteilig die Energiesteuer. Für Erdgas beträgt die sogenannte Energiesteuerrückerstattung bei teilweiser Entlastung 0,442 ct/kWh(Hs).

Die Wartungskosten für das Blockheizkraftwerk und die Investitionskosten sind aus den Kenndaten für Blockheizkraftwerke 2014/2015 der ASUE [4] entnommen. Dort sind Regressionsgleichungen in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des Blockheizkraftwerks gegeben, die hier zusätzlich mit einer Teuerungsrate von 2 % p. a. von 2014 auf 2019 hochgerechnet wurden. Für eine Anlage mit 50 kW elektrischer Leistung ergeben sich danach beispielsweise Investitionskosten von 68 351 Euro für das Blockheizkraftwerk sowie 30 758 Euro (hier 45 % der Kosten des Blockheizkraftwerks) für Transport, Installation und Inbetriebnahme. Die Wartungskosten liegen bei 2,29 ct/kWh_{el}. Bei einem Blockheizkraftwerk mit 200 kW elektrischer Leistung fallen Investitionskosten in Höhe von 167 836 Euro zuzüglich 85 596 Euro für Installation etc. sowie Wartungskosten von 1,55 ct/kWh_{el} an. Die Investitionskosten für den Pufferspeicher, als weitere wichtige Komponente der Anlage, sind aus einem Datenpool von verschiedenen Herstellern ermittelt worden.

Zum Pufferspeicher ist zu sagen, dass diese Komponente nicht nur zur Vermeidung des Taktbetriebs des Blockheizkraftwerks dient, wie noch überwiegend angenommen wird. Der Pufferspeicher erfüllt darüber hinaus wichtige Funktionen in der kurzzeitigen Bereitstellung thermischer Spitzenlast, was hilft, um den Betrieb des Zusatzkessels zurückzudrängen, sowie in der Flexibilisierung des Betriebs eines Blockheizkraftwerks. Aus diesen Gründen sollte der Pufferspeicher keinesfalls zu klein ausgelegt werden.

3 Ergebnisse

Zunächst wird ein Unternehmen aus der Galvanikbranche mit einem jährlichen Strombedarf von 500 MWh und einem jährlichen Wärmebedarf von 1200 MWh betrachtet (Unternehmen 1). Dieses Verhältnis von Strom- zu Wärmebedarf passt gut zum Verhältnis der Strom- und Wärmeerzeugung in einem Blockheizkraftwerk, das bei kleineren Anlagen bei etwa 1:2 liegt und zu größeren hin bis auf etwa 1:1 ansteigt. Die elektrische Leistungsspitze des Unternehmens liegt bei 101,6 kW. Für dieses Unternehmen sind Blockheizkraftwerke verschiedener Größe berechnet worden, konkret wurden Anlagen mit elektrischen Leistungen von 30 kW, 50 kW, 100 kW, 150 kW und 250 kW betrachtet; in *Abbildung 1* ist zu erkennen, dass die kleinen Blockheizkraftwerke mit etwa 8000 Betriebsstunden pro Jahr nahezu durchgängig laufen, aber den Wärmebedarf nur knapp zur Hälfte decken. Bei der größten Anlage mit 250 kW_{el} ist die Wärmedeckung dagegen zu nahezu 100 % möglich bei einer jährlichen Betriebsstundenzahl von etwa 4000. Interessant ist der Verlauf der Stromdeckung, die für Blockheizkraftwerke zwischen 50 kW_{el} und 100 kW_{el} maximal wird, das heißt, in diesem Bereich kann der höchste Anteil des Strombedarfs im Unternehmen

durch das Blockheizkraftwerk gedeckt werden, hier bis zu etwa 75 %. Somit sollte das Blockheizkraftwerk mit der besten Wirtschaftlichkeit in diesem Bereich liegen.

Diese Annahme wird durch *Abbildung 2* bestätigt, in der die Amortisationszeiten aufgetragen sind, die sich mit Hilfe der Annuitätengleichung mit einem Zinssatz von 2 % und den oben gegebenen Randbedingungen zur Wirtschaftlichkeitsrechnung ergeben. Es ist zu erkennen, dass sich das Blockheizkraftwerk mit 50 kW_{el} mit einer Amortisationszeit von zwei Jahren am besten darstellt, gefolgt von den Anlagen mit 30 kW_{el} und 100 kW_{el}, die sich zwischen 2,3 und 2,5 Jahren amortisieren. Dies belegt, dass der Einsatz eines Blockheizkraftwerks in dem betrachteten Unternehmen wirtschaftlich überaus lukrativ ist.

Der Vergleich der verschiedenen Betriebsweisen zeigt, dass die Unterschiede gering sind. Dennoch, mit Ausnahme der Anlage mit 30 kW_{el} führen der stromoptimierte Betrieb ohne und insbesondere mit Lastspitzenmanagement wie erwartet zu einer weiteren, wenn auch hier geringen, Absenkung der Amortisationszeit. Ursache dafür ist der relativ gleichmäßige Stromverbrauch in dem betrachteten Unternehmen, was sich unter anderem dadurch zeigt, dass sich die elektrische Lastspitze bei Betrieb des Blockheizkraftwerks mit einer Leistung von 50 kW_{el} mit Lastspitzenmanagement nur von 101,6 kW auf 83 kW absenken lässt, obwohl die Anlage nahezu 8000 Stunden im Jahr läuft. Die höhere Amortisationszeit beim Blockheizkraftwerk mit 30 kW_{el} im rein stromoptimierten Betrieb ist durch eine geringere Laufzeit des Blockheizkraftwerks im Vergleich zum wärmegeführten Betrieb zu erklären, die in der Sommerzeit bei geringerem Wärmebedarf entsteht, wenn die Anlagen mit geringerer thermischer Leistung auf die Eigenstromdeckung ausgerichtet sind.

Um das Potenzial des stromoptimierten Betriebs eines Blockheizkraftwerks insbesondere mit Lastspitzenmanagement aufzuzeigen, sei im Folgenden auf die Ergebnisse für ein zweites Unternehmen verwiesen (Unternehmen 2), das im Unterschied zu Unternehmen 1 einen erheblich höheren Strombedarf im Vergleich zum Wärmebedarf besitzt und zudem eine elektrische Lastgangkurve mit ausgeprägter Lastspitze aufweist. Konkret beträgt der jährliche Strombedarf in diesem Unternehmen 1850 MWh bei einer elektrischen Leistungsspitze von 740 kW; der jährliche Wärmebedarf liegt bei lediglich 400 MWh. Bedingt durch das quasi umgekehrte Verhältnis von Strombedarf zu Wärmebedarf im Vergleich zu Unternehmen 1 ergibt sich hier eine andere Auslegung für das Blockheizkraftwerk. Während der geringere Wärmebedarf die Leistungsgröße der Anlage einerseits begrenzt, bie-

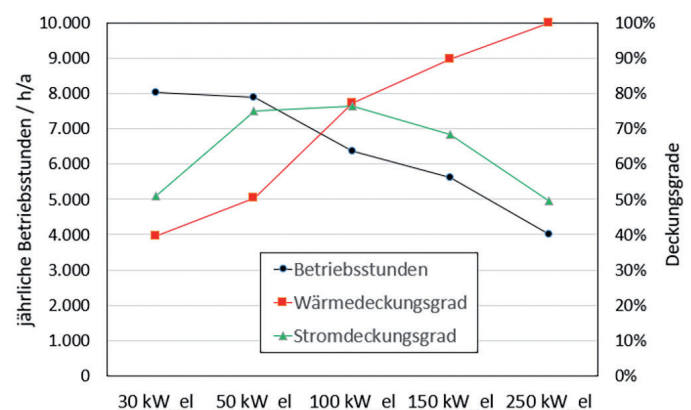


Abb. 1: Betriebsstunden, Wärme- und Stromdeckungsgrad für Blockheizkraftwerke unterschiedlicher Leistung (Unternehmen 1)

OBERFLÄCHEN

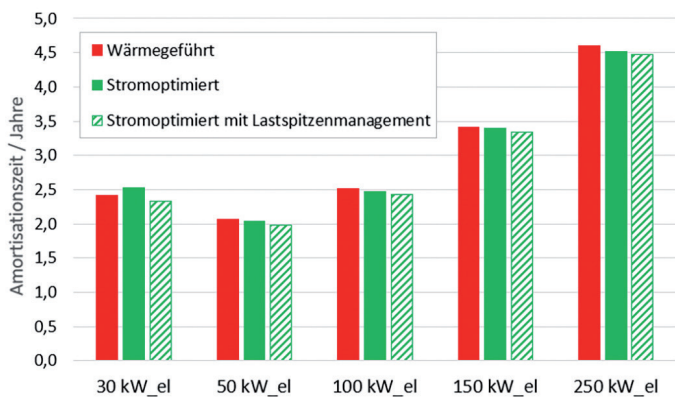


Abb. 2: Amortisationszeiten für Blockheizkraftwerke unterschiedlicher Leistung (Unternehmen 1)

tet der höhere Strombedarf andererseits die Gelegenheit, die Leistung des Blockheizkraftwerks zu erhöhen, da eine größere Menge des erzeugten Stroms direkt im Unternehmen genutzt werden kann; dies ist wirtschaftlich sinnvoller, als den erzeugten Strom in das Netz der öffentlichen Versorgung einzuspeisen. Vor diesem Hintergrund stellt sich für Unternehmen 2 ein Blockheizkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 70 kW als die wirtschaftlichste Variante heraus. Im Unterschied zu Unternehmen 1 erreicht das Blockheizkraftwerk aufgrund der mit Blick auf den Jahreswärmebedarf höheren Leistung eine jährliche Betriebszeit von nur etwa 3500 Stunden.

Dass bei dieser geringeren jährlichen Betriebszeit dennoch ein wirtschaftlicher Betrieb des Blockheizkraftwerks möglich ist, zeigt *Abbildung 3*. Hier sind die Amortisationszeiten für das gewählte Blockheizkraftwerk mit 70 kW elektrischer Leistung aufgetragen, und es ist zu erkennen, dass sich die Anlage zwischen 2,1 und 2,6 Jahren amortisiert. Die Darstellung über der Größe des Pufferspeichervolumens bestätigt die eingangs aufgestellte These, dass der Pufferspeicher nicht zu klein ausgelegt werden sollte, wenn die maximale Wirtschaftlichkeit des Blockheizkraftwerks erreicht werden soll. *Abbildung 3* zeigt, dass die Erhöhung des Pufferspeichervolumens ab einer gewissen Größe keine oder nur noch geringe Verbesserungen bewirkt. Diese Abhängigkeit gilt allgemein, und im vorliegenden Fall wäre ein Pufferspeicher mit einem Volumen von 5 m³ ausreichend.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Betriebsarten fällt auf, dass der stromoptimierte Betrieb insbesondere bei kleinen Pufferspeichern am unwirtschaftlichsten ist. Ursache ist wiederum die durch den Sommerbetrieb verursachte geringere Laufzeit des Blockheizkraftwerks gegenüber dem wärmegeführten Betrieb, wie zuvor ausgeführt. Der Pufferspeicher wirkt dabei ausgleichend, so dass der Effekt mit steigendem Volumen des Pufferspeichers kleiner wird. Deutlich erkennbar ist aber nun der Vorteil des Lastspitzenmanagements. Durch den gezielten Betrieb des Blockheizkraftwerks zu den Zeiten der elektrischen Leistungsspitzen ergibt sich bei ausreichend großem Pufferspeicher (hier mindestens 5 m³) eine Absenkung der Amortisationszeit um etwa 0,2 Jahre, was einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von knapp 10 % entspricht.

4 Fazit

Am Beispiel von zwei Unternehmen mit stark unterschiedlichen Strom- und Wärmebedarfswerten konnte aufgezeigt werden, dass der Einsatz von Blockheizkraftwerken in jedem Fall wirtschaftlich lohnenswert ist. Die berechnete Amortisationszeit lag in günstigsten Fall jeweils bei etwa zwei Jahren. Darüber hinaus ist deutlich geworden,

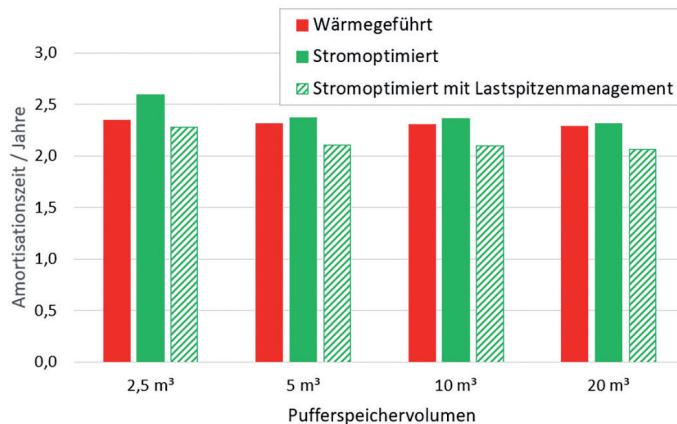


Abb. 3: Amortisationszeiten für ein Blockheizkraftwerk mit 70 kW_{el} und mit Pufferspeichern unterschiedlicher Größe (Unternehmen 2)

dass die Auslegung des Blockheizkraftwerks stark von den Strom- und Wärmebedarfswerten abhängt und dass der Pufferspeicher keinesfalls zu klein ausgelegt werden sollte.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass der Einsatz von Blockheizkraftwerken in Industriebetrieben in vielen Fällen wirtschaftlich ist und deshalb angedacht werden sollte. Dies gilt bereits für den standardmäßig eingesetzten wärmegeführten Betrieb des Blockheizkraftwerks, wobei eine intelligente stromoptimierte Steuerung mit Lastspitzenmanagement die Wirtschaftlichkeit weiter verbessert.

Zur Verstärkung dieser These sei darauf verwiesen, dass Blockheizkraftwerke auf einen längerfristigen Betrieb ausgelegt sind. Das bedeutet, dass bis zu einer Generalüberholung, die nach etwa 50 000 Betriebsstunden fällig ist, neben den bereits einkalkulierten Wartungskosten im Normalfall keine weiteren Instandhaltungskosten anfallen. Bei jährlichen Betriebszeiten von 4000 Stunden bis 8000 Stunden ergibt sich somit ein Betrieb des Blockheizkraftwerkes über sechs bis zwölf Jahre. Wenn die Anlage dabei bereits nach zwei Jahren amortisiert ist, stehen den Kosteneinsparungen gegenüber dem konventionellen Strombezug und dem Betrieb von Heizkesseln in den Folgejahren keine Kapitalkosten mehr entgegen. Wird auf dieser Grundlage die Wirtschaftlichkeit eines Blockheizkraftwerks in den betrachteten Unternehmen über die gesamte Betriebszeit nach der Methode des internen Zinsfußes berechnet, so ergeben sich Werte zwischen 20 % und 30 %, was den lohnenswerten Einsatz entsprechender Anlagen in Industrieunternehmen nochmals eindrucksvoll herausstellt.

Literatur

- [1] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-gas/>
- [2] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): BDEW Strompreisanalyse Juli 2019 - Haushalte und Industrie; Berlin, 23.7.2019
- [3] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168528/umfrage/gaspreise-fuer-gewerbe--und-industriekunden-seit-2006/>
- [4] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE): BHKW-Kenndaten 2014/2015; Berlin, 2014, www.asue.de

Kontakt

Reutlinger Energiezentrum (REZ) – Hochschule Reutlingen, Prof. Dr. Bernd Thomas, M.Sc. Tobias Müller, Alteburgstraße 150, D-72762 Reutlingen; Tel. +49 7121 271 7041; E-Mail: bernd.thomas@reutlingen-university.de, tobias.mueller@reutlingen-university.de

➔ www.reutlingen-university.de/de/forschung/lehr-und-forschungszentren/reutlinger-energiezentrum/

Energieeffizienz in der Galvanotechnik

Von Stefan Kölle, Peter Schwanzer, Christian Dierolf und Ekrem Köse, Stuttgart

Die Einsparung von Energie ist ein wichtiger Schritt, um die von der EU geplante Reduktion von Treibhausgasen zu erreichen. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass die Energiekosten auch zukünftig weiter ansteigen. Dadurch werden Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu einem wichtigen Element, eine wettbewerbsfähige Produktion zu gewährleisten. Das Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA haben in dem vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Projekt *GalvanoFlex_BW* Energieeffizienzmaßnahmen speziell für die Galvanotechnik recherchiert, analysiert und diese in einen Maßnahmenkatalog überführt. Des Weiteren wurde eine Bewertungsmethode entwickelt, die die Unternehmen der Galvanotechnik bei der Identifikation von sinnvollen Energieeffizienzmaßnahmen unterstützen soll.

1 Energieeffizienz – Herausforderungen und Potenziale

Die Energieeffizienz ist ein Gütekriterium und beschreibt, wie rationell ein Prozess mit der eingesetzten Energie umgeht. Insbesondere bei Endkunden ist ein effizienter Umgang mit Energie notwendig, um Verluste beim Energieeinsatz sowie bei der Eigenerzeugung zu vermindern. Energieeffizienz wird daher an verschiedenen Punkten gemessen und sollte über den gesamten Energiewertstrom hinweg betrachtet werden.

Auch die Europäische Union will einen rationellen und nachhaltigen Umgang mit Energie. Hierzu hat sie im Juni 2018 die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 40 %, die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch um 30 % und die Verbesserung der Energieeffizienz um

32,5 % festgeschrieben. Langfristig – also bis zum Jahr 2050 – bedeuten diese Ziele eine Reduktion der Emissionen an Treibhausgasen um 80 % bis 95 % [1]. Um diese Ziele zu erreichen, werden auch weiterhin Anstrengungen unternommen, wie beispielsweise die Förderungen der Einführung eines Energiemanagementsystems und die Förderung der initialen Erstberatung von Energieberatern für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). *Abbildung 1* zeigt, welche Energiemanagementsysteme in der deutschen Industrie, entsprechend ihrer Unternehmensgröße, laut einer Umfrage des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart am häufigsten eingesetzt werden [2]. Neben der Förderung gibt es auch Verpflichtung. So müssen alle nicht-KMU ein Energieaudit durchführen, soweit sie kein Ener-

gie- und/oder Umweltmanagementsystem eingeführt haben und betreiben. Dies wurde im Energiedienstleistungsgesetz (Kurz: EDL-G) beschlossen und im Jahr 2015 zum ersten Mal fällig. Dieses Energieaudit muss dann alle vier Jahre – also auch wieder dieses Jahr – wiederholt werden [3].

Die Galvanikbranche besitzt mit einem Energiekostenanteil von 7 % bis 20 % an den Produktionskosten einen vergleichsweise hohen Energiebedarf [4]. Daher sind die üblicherweise kleinen, mittelständischen Unternehmen, die sich nicht von der EEG-Umlage befreien lassen können, sehr stark von hohen respektive steigenden Energiekosten betroffen. Dies gilt insbesondere für Unternehmen mit sehr energieintensiven Verfahren im Portfolio. Dazu gehören beispielsweise die Hartverchromung, das Hartanodisieren

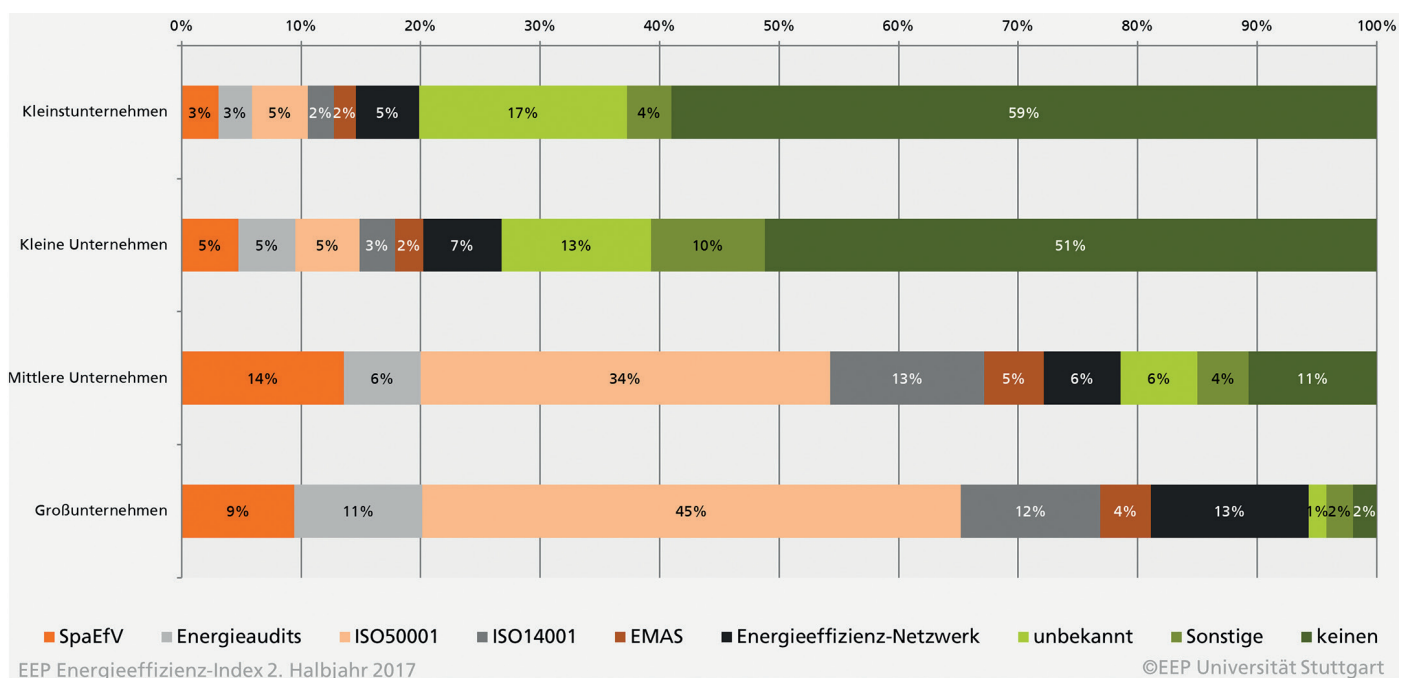


Abb. 1: Systematische Ansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz in Unternehmen nach Betriebsgröße; Befragung mit 1032 Antworten [2]

OBERFLÄCHEN

oder die chemische Vernickelung. Grundsätzlich lohnt sich jedoch immer eine Analyse des energetischen Zustands der Produktion, da sich durch die Auswahl geeigneter Maßnahmen deutliche Einsparungen erzielen lassen. Es wird davon ausgegangen, dass sich in produzierenden Unternehmen Einsparpotenziale durch Energieeffizienzmaßnahmen von 10 % bis 50 % ergeben. Eine Studie aus dem Bereich der Galvanotechnik beziffert die Einsparmöglichkeiten auf einen Bereich von 10 % bis 20 %, je nach Zustand der Anlage und der Art der verwendeten Prozesse und Verfahren [4].

Auf den ersten Blick wäre für viele Unternehmen die Einführung und Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen damit ein logischer und konsequenter Schritt, um die Produktionskosten zu senken und wettbewerbsfähig zu bleiben. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass eine Vielzahl an Hemmnissen vorliegen, die zu einer eher schleppenden Umsetzung von Energiesparmaßnahmen führen. Aus technischer und organisatorischer Sicht können die Gründe für eine zurückhaltende Haltung unklare beziehungsweise lange Amortisationszeiträume, mangelnde Informationen zur absoluten Höhe von Effizienzmaßnahmen, fehlendes Fachwissen sowie fehlende Kapazität sein. Die fehlende Kapazität wirkt sich besonders stark aus, da es häufig nicht die eine Energieeffizienzmaßnahme gibt, sondern für eine nennenswerte Einsparung eine Vielzahl von Maßnahmen identifiziert, koordiniert und projektiert werden müssen. Hinzu kommt, dass nur wenig allgemeingültige Hilfestellungen bezüglich der Identifikation sinnvoller Energieeffizienzmaßnahmen in Abhängigkeit der eingesetzten Verfahren vorliegen.

2 Projekt GalvanoFlex_BW

In dem Projekt *GalvanoFlex_BW*, das vom Umweltministerium Baden-Württemberg gefördert wird, entwickeln mehrere Forschungseinrichtungen und Unternehmen ein richtungweisendes Konzept, wie die Energieversorgung der Galvanotechnik von morgen aussehen könnte. Dabei erforscht das Reutlinger Energiezentrum REZ Betriebsstrategien für die Kraft-Wärme-Kopplung, deren Einsatz in der Galvanotechnik aufgrund der Verteilung von Wärme- und Strombedarf besonders günstig ist. Das Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA beschäftigten sich im Projekt parallel damit, wie ein möglichst

energieeffizienter galvanischer Betrieb gestaltet sein sollte. Dazu wurden in den beteiligten Unternehmen zum einen energetische Messungen durchgeführt und Verbrauchsdaten analysiert. Zum anderen wurden Energieeffizienzmaßnahmen recherchiert und in einen Maßnahmenkatalog überführt. Als letzter Schritt wurde eine Bewertungsmethode erarbeitet, welche die Identifikation von passenden Energieeffizienzmaßnahmen für die Unternehmen erleichtern soll.

2.1 Energieeffizienzmaßnahmen und Maßnahmenkatalog

In der Galvanik wird eine hohe Bandbreite an unterschiedlichen Verfahren mit verschiedensten Parametern eingesetzt. Aus dem Grundprinzip der Galvanik, der elektrochemischen Abscheidung einer Schicht aus einem Elektrolyten bei definierter Temperatur, ergeben sich prozessseitig die thermischen und elektrischen Energieverbräuche als entscheidende Aspekte für die Ermittlung von Energieeffizienzmaßnahmen. Die Verhältnisse von thermischem und elektrischem Energieeinsatz sind dabei stark von den betrachteten Verfahren abhängig. Da eine Beschichtung in der Regel aus einer Abfolge von Vorbehandlungs-, Beschichtungs- und Nachbehandlungsprozessen einschließlich Spülstufen innerhalb einer Anlage besteht, müssen neben den Prozessen (P) auch die Prozessinfrastruktur (I) und die Gebäudeinfrastruktur (G) betrachtet werden. Anhand dieser Unterteilung wurde im Rahmen des Projekts ein Maßnahmenkatalog mit möglichen Effizienzmaßnahmen erarbeitet.

Im Bereich der elektrischen Einsparmöglichkeiten spielt die Reduzierung von Spannungsverlusten an vielen Punkten eine Rolle. Sie beginnt bei der ausreichenden Dimensionierung der Schienen und Kabel, einer bestmöglichen Ausführung der Stromübergänge (Ware – Gestell – Warenträger – Kontaktböcke); aber auch Aspekte der Leitfähigkeit im Elektrolyten sind zu berücksichtigen. Neben spannungsseitigen Einsparmöglichkeiten gilt es zudem, unnötige Stromverbräuche zu minimieren. Dies betrifft beispielsweise die Nutzung von beschichteten Abschirmungen (Stromfänger), und auch die Verwendung von Verfahren mit hoher Stromausbeute (soweit möglich) sowie die Vermeidung von Überbeschichtung.

Die Maßnahmen der Prozessinfrastruktur wurden weiter unterteilt. Hierbei wurde eine der häufigsten Gliederungen in *Energieerzeugung, Energieumwandlung, Energiever-*

teilung und Energiespeicherung genutzt [5]. Die Maßnahmen betreffen die Effizienzsteigerung einzelner Komponenten (z. B. Antriebe, Pumpen), die Reduzierung von Wärmeverlusten (z. B. Isolierung, Deckelung) aber auch die Energieerzeugung und eine mögliche Energierückgewinnung. In Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung, wie in den vorhergehenden Beiträgen der Reihe [6-7] beschrieben, ist aus finanzieller Sicht auch eine Reduzierung der Leistungsbezugsspitzen durch ein Spitzenlastmanagement als Option mit enthalten.

Auf der Ebene der Gebäudeinfrastruktur ist die gesamte Raumluft mit der Gesamtabstaugung als Hauptfaktor zu nennen. Auch auf dieser Ebene sind über intelligentes Management in Kombination mit einer Gesamtbetrachtung und die Optimierung von Komponenten diverse Einsparungen realisierbar.

Die Effekte der einzelnen Maßnahmen sind jeweils einzelfallabhängig, auch die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Maßnahmen. Nachfolgend werden einige Beispiele beschrieben, welche das Potenzial exemplarisch darstellen sollen.

2.2 Beispiel 1: Reduzierte Spannungsverluste durch optimierte Elektrolytleitfähigkeit

Der Anteil der Gleichrichter am Energieverbrauch einer Anlage kann beispielsweise bei Hartchrom bis zu 81 % des Gesamtverbrauchs betragen [4]. Die Reduzierung von Spannungsverlusten stellt daher eine logische und wichtige Effizienzmaßnahme dar.

Neben Hartchrom ist auch das Hartanodisieren ein Verfahren mit einem hohen elektrischen Energieverbrauch. Im Unterschied dazu ist hier weniger die Stromstärke entscheidend, sondern die sehr hohen Spannungen von bis zu 100 V [8]. Ein Faktor dabei ist die niedrige Elektrolyttemperatur von 0 °C, deren Erhöhung bei unveränderten Parametern zu negativ veränderten Schichteigenschaften führt.

Im Projekt *ÖKOXAL: Verbesserte Energieausbeute beim Hartanodisieren* wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA ein Verfahren für das Hartanodisieren entwickelt, das bei erhöhter Elektrolyttemperatur gleichbleibende Schichteigenschaften ermöglicht [9, 10]. Durch das Verfahren sind Einsparpotenziale bezogen auf eine typische Schichtdicke von 30 µm und in Abhängigkeit der zu anodisierenden Aluminiumlegierung von bis zu 40 % möglich.

2.3 Beispiel 2: Vermeidung von Überbeschichtung

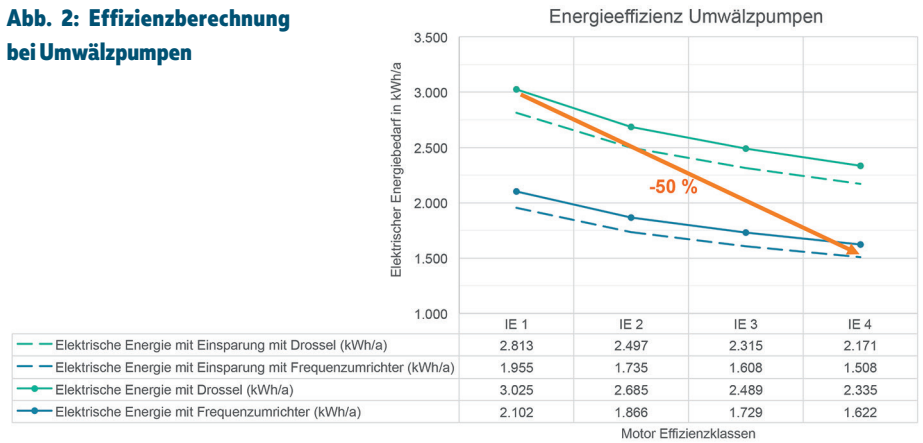
Am Beispiel von hartverchromten Kolbenstangen (Beschichtung in Gestelltechnologie) aus einem Optimierungsprojekt des Fraunhofer IPA bei einem Industriebetrieb werden die Einsparpotenziale für Stangendurchmesser von 50 mm und einer Mindestschichtdicke von 50 μm dargestellt. Auf Basis der Erfahrungen zur Streufähigkeit von Hartchrom wird ein linearer Zusammenhang zwischen primärer Stromdichte und resultierender Schichtdicke angenommen. Bei angenommener Stromausbeute von 20 % wird für eine Chromschicht von 50 μm aus einem sechswertigen Elektrolyten je 1 dm^2 Fläche von einem Strombedarf von etwa 55,8 Ah ausgegangen (bei 100 % Stromausbeute: 0,223 $\text{Ah}/(\mu\text{m}\cdot\text{dm}^2)$ gemäß [11]).

Auf einem Gestell ergab sich im Istzustand eine ungleiche Stromdichteverteilung auf den Stangen. Die Überbeschichtung betrug im Durchschnitt etwa 63 mm^3/dm^2 (7 Ah bzw. zusätzlich 12,6 % zur Sollsichtdicke). Durch eine Optimierung der Positionierung von Anoden und Bauteil durch Simulation der primären Stromdichteverteilung reduziert sich das zusätzliche Schichtvolumen auf etwa 15 mm^3/dm^2 (entspricht 1,7 Ah, Verbesserung von 76 % gegenüber Istzustand). Selbst bei einer höheren Bauteilzahl pro Gestell kann die Überbeschichtung verringert werden (bei drei Stangen 30,8 mm^3/dm^2 bzw. 3,4 Ah geringer, also eine Reduktion von immer noch 50 % bei höherer Anlagenkapazität). Der Energiebedarf für die Überbeschichtung kann somit von zusätzlich 12,6 % auf 6,2 % (drei Stangen) oder 3 % (zwei Stangen) verbessert werden. Weitere positive Nebeneffekte sind gegebenenfalls kürzere Beschichtungszeiten (schnellere Erreichung der Mindestschichtdicke) oder auch geringerer Aufwand im Fall einer Nachbearbeitung.

2.4 Beispiel 3: Erhöhte Energieeffizienz durch frequenzgeregelte Pumpenmotoren

Umwälzpumpen sind ein integraler Bestandteil der Prozessinfrastruktur. Deshalb wurden Pumpen mit unterschiedlichen Effizienzklassen von Antriebsmotoren (IE1 bis IE4) verglichen [12]. Angenommen wurde für eine Referenzanlage mit einem Behältervolumen von 1 m^3 , Umwälzung von viermal pro Stunde, Dauerbetrieb bei 8760 h/a, eine Wellenleistung an der Pumpe von 0,2 kW sowie ein Pumpenwirkungsgrad von 80 %. Der Auslegungspunkt ist auf 75 % der Nennleistung

Abb. 2: Effizienzberechnung bei Umwälzpumpen



definiert. In *Abbildung 2* sind die Energiemengen mit Drossel- und Frequenzregelung dargestellt, sowie zusätzliche Effizienzmaßnahmen wie Wartung und bedarfsgerechte Auslegung von 7 % Effizienzsteigerung berücksichtigt [13].

Wird von einer Drosselregelung mit IE 1-Motor auf einen effizienteren Motor mit Frequenzregelung umgerüstet, sind Einsparungen von bis zu 50 % möglich. Dies entspricht pro Jahr einer elektrischen Energiemenge von etwa 1500 kWh beziehungsweise bei angenommenen Kosten von 18 ct/kWh einem Betrag von 270 Euro pro Behälter beziehungsweise pro Pumpe.

2.5 Methodik zur Auswahl geeigneter Effizienzmaßnahmen

Neben der isolierten Kenntnis von möglichen Maßnahmen ist für eine sinnvolle Optimierung der energetischen Gesamtsituation eine Identifikation beziehungsweise Auswahl für den jeweiligen Einzelfall eines Unternehmens notwendig. Die nachfolgend vorgestellte Methode bewertet die Reihenfolge zur Umsetzung geplanter Energieeffizienzmaßnahmen. Ziel ist es, diese in einer Bewertungsstrategie hinsichtlich ihrer gegenseitigen Beeinflussung zu beurteilen.

Die Bewertungsmatrix zeigt deren negative (-1: reduziert/hemmt den Effekt der Einzelmaßnahme) als auch positive Einflüsse (+1: verstärkt den Effekt der Einzelmaßnahme) auf weitere geplante Energieeffizienzmaßnahmen. Die positive kumulierte Beeinflussbarkeit (PB) bedeutet, wie viele Einzelmaßnahmen existieren, welche die gewählte Maßnahme zusätzlich verstärken. Die positive kumulierte Einflusstärke (PE) beschreibt, wie viele andere Maßnahmen die gewählte Einzelmaßnahme unterstützen kann. Für die negativen Kennzahlen (NB und NE) gilt dies in umgekehrter Weise. Die Kennzahlen sind auf

die Anzahl der vorkommenden Maßnahmen abzüglich der unbesetzten Diagonalen normiert.

Die Matrix als Kern der Bewertungsmethode umfasst in der Galvanotechnik 35 identifizierte mögliche Energieeffizienzmaßnahmen. Die Bewertungsmethode gliedert sich in die folgenden Zwischenschritte:

- Anwenderseitige Beantwortung von Eingangsfragen hinsichtlich geplanter und realisierter Maßnahmen
- Reduzierung der Zeilen und Spalten gemäß der Eingangsfragen: Sind beispielsweise Behälterabdeckungen oder Blenden bereits vorhanden oder nicht umsetzbar, werden diese Maßnahmen aus der Matrix entfernt. Sollen keine hohen Investitionen, beispielsweise verursacht durch den Einsatz eines BHKWs, getätigt werden, entfallen die damit verbundenen Maßnahmen
- Priorisierung nach der Höhe der Kennzahlen (absteigend) in der Bewertungsmatrix
- Anwenderseitige Einordnung der internen Umsetzungswahrscheinlichkeit, aufgelisteter Energieeffizienzmaßnahmen und dargestellter Energieeffizienz: Hierbei können quantitative Aspekte wie beispielsweise absolute Energieverbräuche einzelnen Maßnahmen zugeordnet und berücksichtigt werden.

In *Tabelle 1* werden die Maßnahmen aufgelistet, welche im Auszug *Abbildung 3* zeigt.

Die Einschätzung der gegenseitigen Einflüsse basiert auf Expertenwissen. In Workshops und Vor-Ort-Begehungen einschließlich Messungen beim Anwender erfolgt eine detaillierte Bewertung der Istsituation. Ein triviales Beispiel hierzu ist die Maßnahme zur Reduzierung von Wärme-/Verdunstungsverlusten durch eine Badabdeckung (I.11). Sie beeinflusst negativ die Maßnahme Reduzierung von Wärme-/Verdunstungsverlusten durch Schwimmkörper (I.12). Nach

OBERFLÄCHEN

Tab. 1: Betrachtete Maßnahmen nach der Reduzierung durch die Eingangsfragen (Auszug) mit Prozess (P), Prozessinfrastruktur (I) und Gebäudeinfrastruktur (G)

Maßnahme	Beschreibung
P.8	Reduzierung der Spannungsverluste durch optimierte Leitfähigkeit des Elektrolyten
P.11	Vermeidung von Überbeschichtung (Beschichtungsparameter / Blenden ggfs. mit Spannungsverlusten / Geometrie)
I.5	Steigerung der Energieeffizienz durch frequenzgeregelte Pumpenmotoren
I.11	Reduzierung von Wärme-/Verdunstungsverlusten durch luftgefüllte Kunststoffkugeln, die an der Oberfläche schwimmen
I.12	Reduzierung von Wärme-/Verdunstungsverlusten durch Abdeckung des Elektrolytbehälters
G.3	Reduzierung der Absaugleistung durch Absenkung des Volumenstroms über Nacht

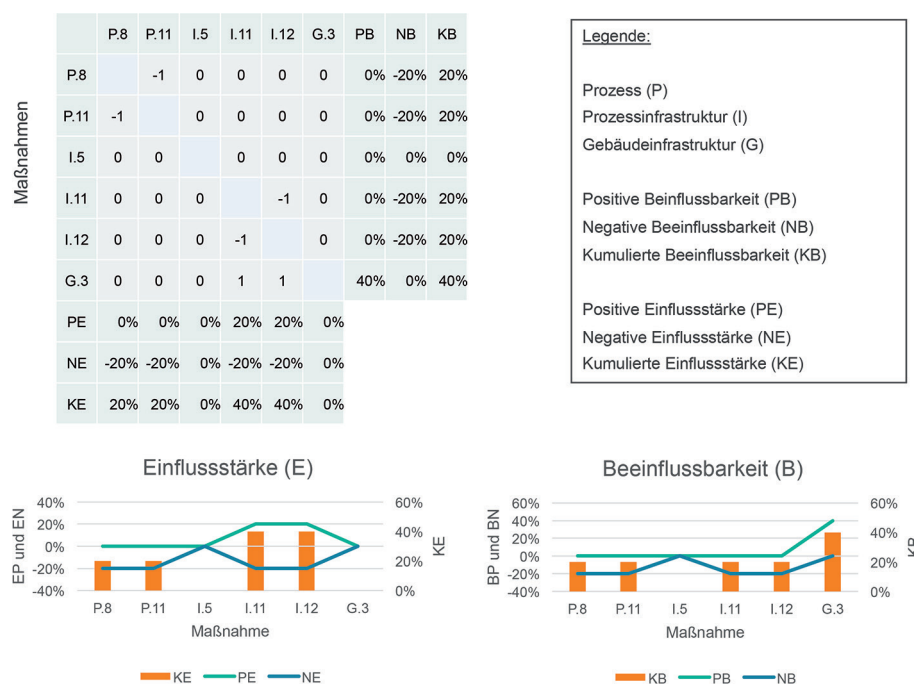


Abb. 3: Bewertungsmatrix für ausgewählte Maßnahmen mit Kennzahlen (Auszug)

Durchführung der Schritte wurden somit die nicht sinnvollen oder nicht durchführbaren Maßnahmen eliminiert und für die übrigen Maßnahmen sind deren Auswirkungen und Wechselwirkungen bekannt.

Ein weiteres Kriterium für die Identifikation von geeigneten Effizienzmaßnahmen ist die Zuordnung der einzelnen Maßnahmen zu Beschichtungsverfahren. Neben der Priorisierung der Maßnahmen durch die Bewertungsmatrix wird damit gewährleistet, dass nur für ein bestimmtes Verfahren geeignete Optimierungen ausgewählt werden. So sind beispielsweise Behälterabdeckungen oder Isolierungen erst ab einem bestimmten Temperaturniveau sinnvoll. In Kombination kann damit die Auswahl aus über 30 Maßnahmen in Abhängigkeit der Ausgangssituation für ein einzelnes Unternehmen stark eingeschränkt werden. Eine Umsetzung der Maß-

nahmen kann somit angepasst an die Bedürfnisse des einzelnen Unternehmens erfolgen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Der effiziente Umgang mit Energie ist ein wichtiger Baustein zu Reduktion von Treibhausgasen. Darüber hinaus lassen sich durch die Reduktion des Energieverbrauchs in Unternehmen die Produktionskosten senken, um auch zukünftig wettbewerbsfähig produzieren zu können. Das Institut für Energieeffizienz in der Produktionstechnik EEP und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA entwickeln im Projekt *GalvanoFlex_BW* eine Methode, mit der Unternehmen für sie spezifische Energieeffizienzmaßnahmen identifizieren können. Damit wird der Situation Rechnung getragen, dass ein häufiges Hemmnis bei der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen be-

reits in deren Auswahl besteht. Die beiden Institute haben für den Aufbau der Methodik eine Vielzahl an Effizienzmaßnahmen recherchiert und analysiert. Daraus wurde eine Bewertungsmethodik aufgebaut, die zukünftig Unternehmen bei der Identifikation und Umsetzung von Energieeffizienz helfen soll.

In der letzten Phase des Projekts werden die Maßnahmen in einem öffentlich zugänglichen Katalog zusammengefasst. Des Weiteren befindet sich eine Homepage im Aufbau, auf der sich Besucher zu möglichen Energieeffizienzmaßnahmen, Kraft-Wärme-Kopplung und über Unterstützung der beteiligten Projektpartner informieren können. Damit leistet das Projekt einen wichtigen Beitrag zur Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs.

Ausblick auf den nächsten Artikel

Im Rahmen des Forschungsprojekts *GalvanoFlex_BW* wurde auch ein Blick auf die sozialen und organisatorischen Aspekte im Zusammenhang mit Energieeffizienzmaßnahmen gerichtet. Neben technischen oder politisch-regulatorischen Bedingungen sind es auch solche Aspekte, die Entscheidungen für Maßnahmen und deren Umsetzung erschweren oder erleichtern. In Ausgabe WO-Mag 12/2019 befasst sich Werner König aus dem Projekt mit Treibern und Hemmnissen aus sozialwissenschaftlicher Sicht.

Anmerkungen

Das Projekt *GalvanoFlex_BW – Stromoptimierte, flexible und residuallastangepasste KWK in der elektrochemischen Beschichtungsindustrie* wird vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg innerhalb des Programms *Transformation des Energiesystems in Baden-Württemberg – Trafo BW* gefördert.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Europäische Energie- und Klimaziele; Umweltbundesamt, 2019; online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/europaeische-energie-klimaziele>; zuletzt geprüft am 27.09.2019
- [2] Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP: Energieeffizienz-Index; online verfügbar unter <https://www.eep.uni-stuttgart.de/eei/archiv-aeltere-erhebungen/>; 2019; zuletzt geprüft am 27.09.2019
- [3] BAFA: Energieaudit; online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieaudit/energieaudit_node.html; 2019; zuletzt geprüft am 27.09.2019
- [4] Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hg.): Effiziente Energienutzung in der Galvanikindustrie; Augsburg, 2003

- [5] M. Krones: A method to identify energy efficiency measures for factory systems based on qualitative modeling; Dissertation; Springer Vieweg, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2017
- [6] E. Köse, A. Sauer, B. Thomas, T. Müller, S. Kölle, P. Schwanzer: Stromoptimierte Kraft-Wärme-Kopplung in der Galvanotechnikbranche; WOMag 7-8/2019; https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2019/07-08/17_galvanoflex_A_08j2019/17_galvanoflex_A_08j2019.php
- [7] B. Thomas, T. Müller: Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken in Galvanikbetrieben; WOMag 9/2019; https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2019/09/50_thomas_energieB_09j2019/50_thomas_energieB_09j2019.php
- [8] T. Jelinek: Oberflächenbehandlung von Aluminium; Leuze Verlag, Saulgau/Württ., 1997
- [9] S. Kölle, K. Schmid, M. Metzner, C. Mock: Das ÖKOXAL-Verfahren: Verbesserte Energieausbeute beim Hartanodisieren; in: A. Michaelis (Hg.), Symposium: Anodisieren - Oxidschichten von hart bis smart; Dresden, 24.-25. November 2016; Fraunhofer Verlag (2016)
- [10] S. Kölle, K. Schmid, C. Mock: Neue Erkenntnisse beim Hartanodisieren; WOMag 11/2015; https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2015/11/23_koelle_alu_11j2015/23_koelle_alu_11j2015.php
- [11] J. Unruh: Tabellenbuch Galvanotechnik; 7. Auflage 2001, Leuze Verlag, Bad Saulgau
- [12] topmotors.ch (Hg.): Effizienzklassen IE1, IE2, IE3 und IE4 Wirkungsgrade; 2014; Die neue Norm IEC 60034-30-1 definiert seit März 2014 den Standard für die Wirkungsgrade von IE1-, IE2-, IE3- und IE4-Motoren; online verfügbar unter https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_13_Wirkungsgrade.pdf; zuletzt geprüft am 11.02.2019
- [13] H. Falkner: Lot 11 - Water Pumps. (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture); in: AEA Energy & Environment; 2008

Die Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Galvanikunternehmen – Treiber und Hemmnisse aus sozialwissenschaftlicher Sicht

Von Werner König, REZ Hochschule Reutlingen

Die Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in kleinen und mittleren Unternehmen der Galvanotechnik stellt ein erklärtes Ziel des Landes Baden-Württemberg und des Forschungsprojekts *GalvanoFlex_BW* dar. Als komplexe Energieeffizienzmaßnahme stellt die Kraft-Wärme-Kopplung erhöhte Anforderungen an die Unternehmen und das professionelle Umfeld (Beratung, Service, Handwerk, Contracting). Hemmnisse zur Umsetzung der Technologie finden sich daher sowohl innerhalb der Unternehmen als auch außerhalb. Die Hemmnisse bei der Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung in der Galvanotechnik sind auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen, wie hohe Komplexität der KWK-Technologie, schwierige Bewertung des Gesamtnutzens im Unternehmen, mangelnde personelle Ausstattung oder auch fehlende Unternehmerentscheidungen. Empfehlungen der Forschungspartner zu deren Überwindung können aus den Ergebnissen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung gewonnen werden.

1 Einleitung

Die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist eine Schlüsseltechnologie, um die industriellen Treibhausgasemissionen zu senken und für ein nachhaltiges Energiesystem der Zukunft zu sorgen. Dem Ausbau der Technologie kommt daher insbesondere in Baden-Württemberg große Bedeutung zu [1]. Die Galvanotechnik lässt sich als ein idealer Anwendungsfall für den flexiblen Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnen. Betriebe der Galvanotechnik zählen in der Regel zu den Unternehmen mit überdurchschnittlich hohen Energiekosten und sind – je nach verwendeten Verfahren – auf die kombinierte Versorgung mit Prozesswärme und elektrischem Strom angewiesen.

Angesichts steigender Energiepreise, zunehmender Nachhaltigkeitsdebatten, Diskussionen über zukünftige CO₂-Bepreisung und dem Einsparpotential der Technologie [2, 3], erscheint der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung in der Galvanotechnik bei distanzierter Betrachtung als Selbstläufer. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass profitable und theoretisch mögliche Energieeffizienzmaßnahmen von Unternehmen häufig nicht aufgegriffen werden [4] – eine betriebswirtschaftliche Merkwürdigkeit, für die sich in der Forschung der Begriff des *energy efficiency-paradox* [4] etabliert hat.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderte Projekt *GalvanoFlex_BW* [15, 6] neben Fragen der technischen und wirtschaftlichen Implementierung der residuallast-angepassten Kraft-Wärme-Kopplung auch mit sozialen Aspekten bei der Umsetzung. Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung im Rahmen des Projekts widmete sich daher insbesondere der Identifikation von Hemmnissen für den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung in den teilnehmenden Partnerunternehmen. Dabei sollte festgestellt werden, welche Hemmnisse fall-spezifisch (fakultativ) auftreten können, und welche sich als systematisch festhalten lassen. Im Rahmen eines Workshops von den Projektpartnern Anfang November wurde über jene systematischen Hemmnisse und mögliche Lösungen diskutiert (Abb. 1).

Kraft-Wärme-Kopplung stellt zweifellos das Gegenteil einer niederschweligen Energieeffizienzmaßnahme dar. Gerade im Kontext der Galvanotechnik handelt es sich um eine Maßnahme hoher Komplexität. Es ist durchaus angebracht von einem System KWK zu sprechen – insbesondere vor der Perspektive der flexiblen Anpassung an die fluktuierende Stromerzeugung im Rahmen der Energiewende und der Ausschöpfung weiterer Einsparpotentiale durch die Integration mit weiteren Erzeugungsanlagen (z. B. Photovoltaik). Die Entscheidung für den Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung ist mithin reich an Voraussetzungen und Konsequenzen, von unterschiedlichen Faktoren abhängig (multifaktoriell) und – unter den gegebenen institutionellen Randbedingungen – von außen unterstützbar, aber kaum direkt steuerbar oder gar zu erzwingen.

Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung wurde eine Reihe von Aspekten identifiziert, die eine Entscheidung für die Kraft-Wärme-Kopplung in den kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) der Galvanik hemmend oder treibend beeinflussen. Wie in *Abbildung 2* ersichtlich, wurden diese Aspekte in sieben Kategorien unterteilt. Die Darstellung der Barrieren konzentriert sich im Folgenden auf die verallgemeinerbaren internen und externen Aspekte. Dies bedeutet jedoch keine Geringschätzung der fallspezifischen Faktoren. Im Gegenteil müssen fallspezifische Faktoren als größtes Hemmnis der Auseinandersetzung mit der Kraft-Wärme-Kopplung in den Unternehmen betrachtet werden. Verkürzt ausgedrückt lässt sich



Abb. 1: Workshop der Forschungspartner im Projekt *GalvanoFlex_BW* an der Hochschule Reutlingen

2 Hemmende und treibende Aspekte der KWK-Umsetzung

Bevor im Folgenden die einzelnen identifizierten Hemmnisse näher erläutert werden, sollen zu einem besseren Verständnis die wesentlichen festgehaltenen Eckpunkte zur Natur der Entscheidung für die Kraft-Wärme-Kopplung vorausgeschickt werden. Die

der überwiegende Teil dieser Faktoren unter den Schlagworten *andere Prioritäten/keine Zeit* zusammenfassen. Zugleich lassen sich diese Faktoren von außen kaum direkt beeinflussen.

2.1 Soziotechnik

2.1.1 Aufwand und Ressourcenbindung

Als komplexe Energieeffizienzmaßnahme erfordert die Kraft-Wärme-Kopplung einen hohen personalen und organisatorischen Aufwand. Ein typischerweise langer Planungs- und Umsetzungsprozess bindet häufig kritisches Personal. Ein Vorhaben wie die Implementierung der Kraft-Wärme-Kopplung steht in diesem Kontext im internen Wettbewerb mit anderen betrieblichen Vorhaben. Insbesondere KMU verfügen nicht über die personalen Ressourcen, um mehrere Projekte parallel stemmen zu können. Dazu kommt, dass kleine Galvanikbetriebe als Dienstleister beziehungsweise Lohnbeschichter häufig bereits mit dem Tagesgeschäft hinreichend ausgelastet sind. Die Nutzung von Contracting-Angeboten (z. B. Energiespar- oder Energieliefer-Contracting) stellt sich dagegen aus der Sicht der Forschungspartner als wesentlicher Ausweg der Ressourcenproblematik dar. Jedoch werden auch bei umfassender Externalisierung interne Ressourcen benötigt (z. B. für Datenbereitstellung, Koordinierung).

2.1.2 Multifunktion und -nutzen

Gleichwohl der wirtschaftliche Nutzen der Kraft-Wärme-Kopplung aus Sicht der Unternehmen verständlicherweise das wichtigste Kriterium ist, sind es auch weitere Funktionen, welche die Technologie für das Unternehmen erfüllen kann. Aus technisch-wirtschaftlicher Sicht bietet der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung die Möglichkeit der Optimierung des Lastmanagements oder die Anbindung an weitere Erzeugungssysteme. Im Einzelfall kann die Risikominimierung mittels Kraft-Wärme-Kopplung (Notstrom, Gewährleistung Netzstabilität) von besonderem Interesse sein.

Aus organisatorisch-strategischer Sicht bietet die Technologie weiteren potentiellen Nutzen für ein Unternehmen der Galvanotechnik, die als eine der energieintensiven Branchen der zunehmenden ökologischen Erwartung der Gesellschaft ausgesetzt ist. Die Kraft-Wärme-Kopplung bietet die Möglichkeit, den CO₂-Fußabdruck eines Unternehmens wesentlich zu senken und zugleich einer zukünftigen Bepreisung einer Kohlenstoffdioxidemission aktiv zu begegnen. Daneben kann eine positive ökologische Außendarstellung anhand der eingesparten Energieträger im Zuge des Einsatzes der Kraft-Wärme-Kopplung besonders plastisch vorgenommen werden. Seitens der Projektpartner wird jedoch davon ausgegangen, dass die Nutzungsmöglichkeiten des Einsatzes der Technologie häufig nicht bekannt

sind. Zugleich wird jedoch davon ausgegangen, dass ein über die Wirtschaftlichkeit hinausgehender Nutzen zumeist nur einzelfall-spezifisch betrachtet werden kann.

2.1.3 Transparenz der Produktions- und Energieprozesse

Eine hinreichende Erfassung der Produktions- und Energieprozesse sowie deren Interpretation sind eine Notwendigkeit zur Entscheidungsanbahnung und -findung zu Gunsten der Kraft-Wärme-Kopplung. Zugleich zeigt sich die Energie- und Prozessdatenerfassung als Herausforderung für kleine und mittlere Unternehmen. Insbesondere der flexible Betrieb der Kraft-Wärme-Kopplung setzt Unternehmen als Energiedatenerfassungsbetriebe voraus.

Die hinreichende Digitalisierung der Produktionsprozesse stellt sich mithin als Notwendigkeit zur Integration und Optimierung der Kraft-Wärme-Kopplung dar. Aufwand und Möglichkeiten der Digitalisierungsmaßnahmen werden jedoch von der jeweiligen materiellen und technischen Ausstattung in den einzelnen Unternehmen bestimmt. Unabhängig davon herrscht unter den Projektpartnern Konsens, dass die institutionelle Förderung der Digitalisierung in industriellen Unternehmen die technisch-organisatorischen Randbedingungen für den Einsatz komplexer Energieeffizienzmaßnahmen wie die Kraft-Wärme-Kopplung indirekt verbessern hilft und verstärkt werden sollte.

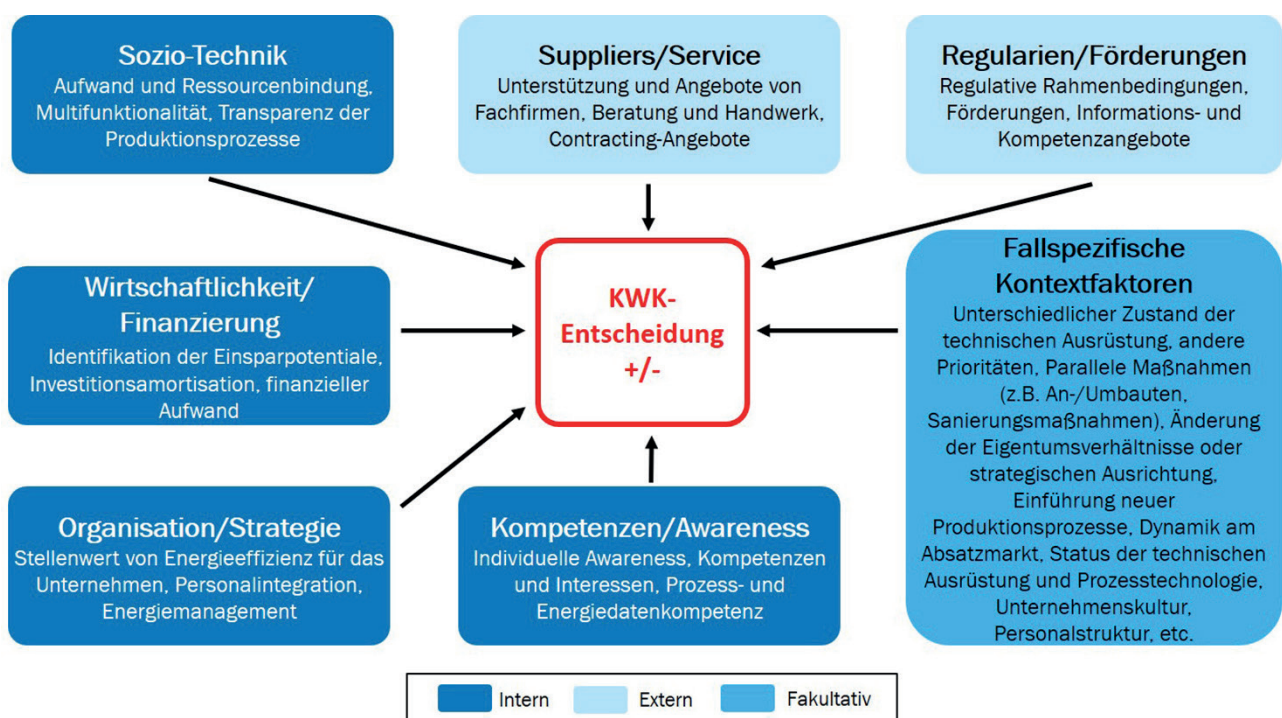


Abb. 2: Darstellung der identifizierten Hemmnisse im Projekt GalvanoFlex_BW

OBERFLÄCHEN

2.2 Wirtschaftlichkeit und Finanzierung

2.2.1 Identifikation der Einsparpotentiale

Die mangelnde Identifikation von Einsparpotentialen in kleinen und mittleren Unternehmen wird in empirischen Studien häufig als wesentliches Hemmnis der Adoption energieeffizienter Technologie betrachtet [7]. Die Identifikation der Einsparpotentiale mittels Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet grundsätzlich zwei Seiten einer Medaille. Zum einen müssen hinreichende Produktions- und Prozessdaten vorliegen, die eine Einschätzung ermöglichen. Zum anderen müssen Funktion und Nutzen der Kraft-Wärme-Kopplung ausreichend bekannt sein, um deren Effekte einschätzen zu können. Im Zusammenhang mit den oben genannten Aspekten ergibt sich ein problematischer Zirkel: Eine mangelnde Transparenz der Produktions- und Energieprozesse und ein mangelndes Verständnis der KWK-Technologie erschweren die Identifikation von Einsparpotentialen, die wiederum die Basis für die Entscheidung über Maßnahmen sein sollte. Diesem Hemmnis kann aus Sicht der Projektpartner nur durch eine aktive Bewerbung über den Nutzen und die Wirtschaftlichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung begegnet werden – sowohl seitens der Marktteilnehmer als auch durch vermittelnde Instanzen wie beispielsweise Verbände und Kammern.

2.2.2 Finanzieller Aufwand

Die Investition in die Kraft-Wärme-Kopplung kann insbesondere für kleine Unternehmen der Galvanotechnik einen erheblichen finanziellen Aufwand bedeuten. Kapitalverfügbarkeit und finanzieller Aufwand werden in einer Reihe von Studien als wesentliche Hemmnisse für Investitionen in Energieeffizienztechnologie festgehalten [8]. Angesichts dessen liegt die Annahme nahe, dass vor allem die Kosten der Kraft-Wärme-Kopplung das größte Hemmnis für Unternehmen darstellen – in noch höherem Maße werden vermutlich die vor dem Betrieb anfallenden Opportunitätskosten bei der Sondierung, Planung oder Suche nach externer Unterstützung als solches gesehen.

Nach Einschätzung der teilnehmenden Partner im Reallabor erscheint der finanzielle Aufwand hingegen als geringes Hemmnis. Sofern die Wirtschaftlichkeit als positiv prognostiziert werden kann, sei die Finanzierung der Kraft-Wärme-Kopplung ein durch-

aus bewältigbarer Akt für die überwiegend kleineren Unternehmen der Galvanotechnik. Anhaltend günstige Kreditzinssätze und verfügbare Möglichkeiten der finanziellen Förderung stellen hierbei günstige Bedingungen dar. Vor diesem Hintergrund seien womöglich eine mangelnde Risikobereitschaft unter den Entscheidungsträgern verbunden mit einem mangelnden Interesse am System Kraft-Wärme-Kopplung ein größeres Hemmnis als der finanzielle Aufwand.

2.2.3 Investitionsamortisation

Sowohl die notwendigen komplexen Prognosen zur Wirtschaftlichkeit als auch die Wahl der richtigen Kennzahlen stellen sich als Hemmnis bei der Bewertung der Kraft-Wärme-Kopplung dar. Insbesondere im betriebsinternen Wettbewerb gegenüber anderen möglichen Investitionen können diese Aspekte den Ausschlag zu Ungunsten der Kraft-Wärme-Kopplung geben. Bei Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mittels ROI (Return on Investment) wird von den Projektpartnern eine Amortisationsdauer von vier Jahren als angemessen eingeschätzt. Gleichwohl wurde im Rahmen des Workshops an der Hochschule in Reutlingen im November 2019 von den Teilnehmern kritisch diskutiert, ob der ROI überhaupt eine taugliche Kennzahl für die Wirtschaftlichkeitsberechnung der Kraft-Wärme-Kopplung darstellt. Die Berücksichtigung des Internen Zinsfuß (IRR – Internal Rate of Return) würde sich dagegen als passendere Kennzahl erweisen und die Wirtschaftlichkeit der Technologie realistischer und zugleich attraktiver abbilden. Eine dogmatische Bindung an den ROI als alleinige Kennzahl zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der Kraft-Wärme-Kopplung sollte aus der Sicht der Projektpartner daher zurückgewiesen werden.

2.3 Organisation und Strategie

2.3.1 Stellenwert von Energieeffizienz für das Unternehmen

Ausgehend der klassisch soziologischen Prämisse, dass die Bedeutung, die Menschen Dingen beimessen, die Grundlage für ihr Handeln bildet [9], erscheint die Frage nach der Bedeutung von Energieeffizienz für ein Unternehmen und ihr Effekt auf betriebliche Entscheidungen beachtenswert. Die Einschätzung der Projektpartner über die Relevanz des Stellenwerts von Energieeffizienz für ein Unternehmen der Galvanotechnik zeigte sich dabei ambivalent. Einerseits

wird ein hoher Stellenwert als entscheidend für die Bereitschaft der Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung betrachtet. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass oftmals Lieferfähigkeit und Produktqualität eine wichtigere Rolle als Energie spielen; Maßnahmen zur Energieeinsparung werden häufig nur als Randthema behandelt. Steigende Energiepreise, eine mögliche CO₂-Bepreisung und steigender Wettbewerbsdruck sollten dagegen den Stellenwert von Energieeffizienz zunehmend steigern.

2.3.2 Personalintegration

Die Komplexität der Kraft-Wärme-Kopplung als Energieeffizienzmaßnahme stellt sich – auch bei externer Unterstützung – als Teamaufgabe im Unternehmen dar. Die Einbindung von technischem, organisatorischem und kaufmännischem Personal ist eine organisatorische Bedingung für den Einsatz (von der Planung bis zum Betrieb) der Kraft-Wärme-Kopplung. Dementsprechend verlangt die Technologie von den Unternehmen sowohl entsprechende Strukturen als auch eine kooperative Unternehmensführung. Insbesondere Schlüsselpersonen (z. B. Personal mit hinreichenden Kompetenzen und Interesse an der Technologie) können hierbei im Einzelfall eine treibende Rolle spielen.

2.3.3 Energiemanagement

Energiemanagement wird allgemein als wichtiger Treiber zur Steigerung von Energieeffizienz und der Diffusion von energieeffizienter Technologie betrachtet [10, 11]. Dabei muss das Betreiben von Energiemanagement nicht notwendigerweise mit dem normgerechten Energiemanagementsystem ISO 50001 gleichgesetzt werden – zumal eine Zertifizierung aufgrund des hohen Aufwands für kleine und mittlere Unternehmen häufig nicht angestrebt wird. Nichtsdestoweniger muss Energiemanagement – verstanden als strategisches Management von Energie verknüpft mit der Einbindung und Sensibilisierung der Mitarbeiter und der Nutzung eines breiten Spektrums verschiedener Maßnahmen [12] – als ein wesentlicher Treiber zur Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung aufgefasst werden. Die Förderung von Energiemanagement in den Unternehmen der Galvanik würde demnach dazu beitragen, günstige organisationale Bedingungen zu schaffen, um eine komplexe Energieeffizienzmaßnahme wie die Kraft-Wärme-Kopplung erfolgreich umsetzen zu können.

2.4 Kompetenzen und Awareness

2.4.1 Individuelle Awareness, Kompetenzen und Interessen

Obwohl die Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung eine Teamaufgabe im Unternehmen darstellt, bedarf es dem individuellen Einsatz und Commitment der Unternehmensführung. Energiesparen muss Chef-sache sein, brachte es ein Workshop-Teilnehmer auf den Punkt. Insbesondere in inhabergeführten kleinen und mittleren Unternehmen herrscht in der Regel eine starke Entscheidungs-zentralisierung. Ein mangelndes Interesse für die Technologie und deren Zusammenhang bedeutet in diesem Zusammenhang ein erhebliches Hemmnis. Hingegen sind individuelle Erfahrungen mit anderen ähnlichen Maßnahmen und ein hohes Interesse an der Technologie ein starker Treiber der Entscheidung für die Kraft-Wärme-Kopplung.

2.4.2 Prozess- und Energiedatenkompetenz

Oben wurde bereits angemerkt, dass eine hinreichende Transparenz der Produktions- und Energieprozesse eine Notwendigkeit der Entscheidungs-anbahnung bis zur Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung bedeutet. Die Betrachtung eines Galvanikunternehmens als *Energiedatenbetrieb* erfordert hinreichende Kompetenzen der Messtechnik, Datenerhebung und Dateninterpretation innerhalb des Betriebs, kurzum Digitalisierungsexperten. Diese Expertise wird bei flexiblem und residuallast-angepasstem Betrieb der Kraft-Wärme-Kopplung noch bedeutender. Der Problematik des Fachkräftemangels in mittelständischen Unternehmen wurde in diesem Zusammenhang von den Forschungspartnern problematisiert.

2.5 Suppliers und Service

2.5.1 Externe Unterstützung

Uneingeschränkter Konsens herrscht unter den Projektteilnehmern darüber, dass die Umsetzung und Verbreitung der Kraft-Wärme-Kopplung in der Galvanotechnik stark von der externen Unterstützung von Fachbetrieben, Beratungsunternehmen und Handwerksbetrieben abhängig ist. Die Qualifikationsanforderung an externe Unterstützung wird dabei besonders hoch angesetzt, da neben dem vorausgesetzten Wissen über die state-of-the-art-Technologie und den regulativen Rahmenbedingungen auch ein Ver-

ständnis der grundlegenden Prozesse der Galvanotechnik (*Universalkompetenz*) gefordert wird. Hemmend wirken sich in diesem Zusammenhang eine allgemein wahrgenommene *Beratungsinflation* und schlechte Erfahrungen mit externen Akteuren aus. Die Herstellung institutioneller Qualifikationsstandards könnte aus Sicht der Projektpartner eine Lösung zur Qualitätssteigerung der Energieberatung sein.

2.5.2 Contracting-Angebote

In Anbetracht der herausfordernden Natur der Kraft-Wärme-Kopplung für kleine Unternehmen der Galvanotechnik, den oben genannten Hemmnissen und nicht zuletzt den fallspezifischen Faktoren (andere Prioritäten/keine Zeit), versprechen Contracting-Angebote das geeignete Gegenmittel zu sein. Allgemein und seitens des Bundes wird Contracting daher als marktbasierendem Instrument großes Anwendungspotential zugestanden [13]. Auch unter den Projektpartnern herrscht Konsens über die Nützlichkeit von Contracting; Contracting ist demzufolge die *Lösung vieler Probleme*, wie es einer der Workshop-Teilnehmer ausdrückte.

Problematisiert wurde dagegen die häufig skeptische Haltung von Unternehmen. Das zwiespältige Image von Contracting-Angeboten ist angesichts der entlastenden Funktion sachlich nicht notwendigerweise einfach nachzuvollziehen. Als ein Grund wurde die verbesserungswürdige Vermarktung von Contracting festgehalten. Bereits der Begriff würde mitunter abschreckend wirken, die Etablierung eines zugänglicheren Begriffs könnte Unternehmen womöglich bereits zu größerem Interesse reizen.

2.6 Regularien und Förderungen

2.6.1 Regulative Rahmenbedingungen

In welchem politischen und ordnungsrechtlichen Umfeld der Einsatz von KWK-Technologien stattfindet, hat grundsätzlich Auswirkungen darauf, wie sich Unternehmen mit der Thematik auseinandersetzen – das zeigen Vergleiche zwischen europäischen Staaten [14]. Die Kenntnis der vielfältigen und komplexen gesetzlichen Rahmenbedingungen ist für die Planung und Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung unverzichtbar. Insbesondere Praktiker sehen in diesen steuerlichen und ordnungsrechtlichen Aspekten daher häufig das größte Hindernis für Investitionen. Wenngleich auch die Unternehmen die Perspektive einer Überregulierung teilen,

wirken sich die regulativen Aspekte nur indirekt aus. Bei der Planung und Umsetzung durch Beratungsunternehmen oder Fachunternehmen wird dieser Aspekt den externen Akteuren verantwortet. Dennoch: Im Kontext steigender Anforderungen an beschichtete Oberflächen und dem Umgang mit neuen gesetzlichen Vorschriften kann eine allgemeine Wahrnehmung der *Überregulierung* bereits eine Ablehnung auslösen.

2.6.2 Förderungen

Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in der Industrie (inkl. der Kraft-Wärme-Kopplung) werden auf Bundes- und Landesebene durch eine Reihe von Angeboten (z. B. Zuschüsse, Darlehen für Beratung und Investitionen) unterstützt. Unter den Projektpartnern herrscht hierbei die allgemeine Wahrnehmung undurchsichtiger Förderinstrumente, der mangelnden Unterstützung bei der Suche nach Fördermitteln und einem ungünstigen Aufwand/Nutzen-Verhältnis. Die Einschätzung der Projektpartner deckt sich dabei mit den Ergebnissen einer Umfrage unter 500 industriellen kleinen und mittleren Unternehmen in Baden-Württemberg [12].

Gleichwohl und ähnlich wie oben, verlassen sich die Unternehmen in der Regel auf die Unterstützung externer Beratung zur Ausschöpfung von Fördermitteln. Zudem werden finanzielle Anreize nicht als das kritische Kriterium bei der Entscheidung für die Kraft-Wärme-Kopplung betrachtet. Nichtsdestotrotz sollten Möglichkeiten der praktischen Förderinstrumente für den Einsatz der Technologie aus der Sicht der Projektteilnehmer für Unternehmen der Galvanotechnik einfach verfügbar gemacht werden.

2.6.3 Informations- und Kompetenzangebote

Der Mangel an verfügbaren Informationen ist ein häufig genanntes Hemmnis der Adoption von energieeffizienten Technologien [7]. In Anbetracht vielfältiger Informationsangebote – angefangen von der Einrichtung des Kompetenzzentrums KWK, Informationsbroschüren oder Webinaren seitens des Umweltministeriums Baden-Württemberg, bis zu den Informationen von Fachunternehmen – muss doch festgehalten werden, dass zumindest grundlegende Informationen rund um die KWK-Technologie auch für Laien problemlos gewonnen werden können. Zwei Fragen rücken daher in den Vordergrund:

– Die Frage der Kommunikationswege, mit denen die Unternehmen der Galvanotech-

OBERFLÄCHEN

nik vermutlich effektiver auf die Kraft-Wärme-Kopplung als wirtschaftliche Energieeffizienzmaßnahme aufmerksam gemacht werden können. Die verstärkte Einbindung von Kammern und Verbänden wurde dabei von den Projektpartnern als Lösung diskutiert.

- Die Herausforderung, Unternehmen überhaupt dazu zu bringen, nach Informationen zu suchen. In einer Umfrage unter 500 industriellen KMU in Baden-Württemberg gaben nur rund 30 % der Unternehmen an, sehr oder eher aktiv nach Energieeffizienzmaßnahmen zu suchen [12]. Eine Lösung dafür könnten proaktive Informationskampagnen von lokalen Institutionen (z. B. der Industrie- und Handelskammer) oder von Verbänden der Galvanotechnik sein.

3 Zusammenfassung und Empfehlungen

Wie *Abbildung 3* verdeutlicht, wurden die fallspezifischen Faktoren als größtes Hemmnis bei der Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung identifiziert. Dem Outsourcing mittels Contracting wird daher das größte Potential zur Umsetzung der Kraft-Wärme-Kopplung in der Galvanotechnik beigemessen, wengleich dessen Image als verbesserungsbedürftig eingeschätzt wird. Attraktive Angebote im Bereich Energiespar-Contracting und Energieliefer-Contracting speziell für die Galvanotechnik wären hierfür der Idealfall. Wengleich die externen Hemmnisse von den Projektpartnern bedeutender als die internen eingeschätzt werden, so sind gerade diese mitunter schwieriger zu überwinden, wie beispielsweise ein mangelndes Interesse der Geschäftsführung an Energieeinsparungen oder der Technologie. Mit Blick auf die Unternehmen lassen sich die diskutierten Hemmnisse unter der Parole *KWK-Reife* zusammenfassen. Verstanden als die Fähigkeiten eines Unternehmens, eine komplexe Energieeffizienzmaßnahme wie die Kraft-Wärme-Kopplung erfolgreich umsetzen zu können, beinhaltet sie:

– Energieeffizienz als wesentlichen Teil der Unternehmensstrategie

- technisch-organisatorische Maßnahmen (z. B. Energie- und Prozess-Monitoring)
- organisatorische Maßnahmen (Verteilung von Aufmerksamkeit und Verantwortung)
- hinreichende individuelle Kompetenzen

Die *KWK-Reife* von Unternehmen der Galvanotechnik kann gefördert werden durch:

- Einführung von Energiemanagement in den Unternehmen
- verstärkte Förderung der digitalen Transformation in Unternehmen der Galvanotechnik
- institutionelle Förderung von Kompetenzen im Bereich digitaler Transformation und Technologiekompetenz (z. B. durch entsprechende Schwerpunkte in der Aus- und Weiterbildung)
- proaktive Verbreitung von Informationen zu Nutzen und Wirtschaftlichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung in der Galvanotechnik durch Verbände, Kammern oder im Rahmen von Energieeffizienz-Netzwerken.

Mit Blick auf die externen Hemmnisse sollten Informationen zu den relevanten Regularien und Förderungen der Kraft-Wärme-Kopplung Unternehmen der Galvanik einfach zugänglich gemacht werden. Insbesondere die Informationsverbreitung über den Nutzen und die Wirtschaftlichkeit der Technologie in der Galvanotechnikbranche sollte vorangetrieben werden. Diesem Zweck widmet sich dezidiert eine im Rahmen des Projekts GalvanoFlex_BW entwickelte Homepage, die in Kürze online gehen wird. Auf dieser Seite sind die wesentlichen Ergebnisse der Forschung zusammengefasst. Die Forschungspartner empfehlen den Interessenten, an der Umsetzung der KWK über diesen Weg teilzunehmen.

Literatur

- [1] Landeskonzept Kraft-Wärme-Kopplung Baden-Württemberg; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2015); <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/service/publikationen/publikation/did/landeskonzept-kraft-waerme-kopplung-baden-wuerttemberg/>
- [2] E. Köse, A. Sauer, B. Thomas, T. Müller, S. Kölle, P. Schwanzer: Stromoptimierte Kraft-Wärmekopplung (KWK) in der Galvanotechnikbranche – Steigende Energieflexibilität durch residuallast-angepasste KWK; WOMag 8/2019; www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2019/07-08/17_galvanoflex_A_08j2019/17_galvanoflex_A_08j2019.php
- [3] B. Thomas, T. Müller: Wirtschaftlichkeit von Blockheizkraftwerken in Galvanikbetrieben; WOMag 9/2019; www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2019/09/50_thomas_energieB_09j2019/50_thomas_energieB_09j2019.php
- [4] T. G. Gerarden, R.G. Newell, R. Stavins: Addressing the Energy-Efficiency Gap; Cambridge, Mass.: Harvard Environmental Economics Program, Jan. 2015
- [5] S. DeCanio: The efficiency paradox: bureaucratic and organizational barriers to profitable energy-saving investments; Energy Policy 26 (1998) 5, S. 441-454
- [6] S. Kölle, P. Schwanzer, C. Dierolf, E. Köse: Energieeffizienz in der Galvanotechnik; WOMag 10/2019; www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2019/10/22_koelle_energieC_10j2019/22_koelle_energieC_10j2019.php
- [7] E. Cagno, A. Trianni: Evaluating the barriers to specific industrial energy efficiency measures: an exploratory study in small and medium-sized enterprises; Journal of Cleaner Production, 82 (2014), S. 70-83
- [8] H. L. F. De Groot, E. T. Verhoeff, P. Nijkamp: Energy savings by firms: decision-making, barriers and politics. Energy Economics, Vol. 23 (2001), S. 717-740
- [9] H. Blumer: Symbolic interactionism: perspective and method; University of California Press: California, 1986
- [10] J. Palm, P. Thollander: An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency; Applied Energy, 87 (2010), S. 3255-3261

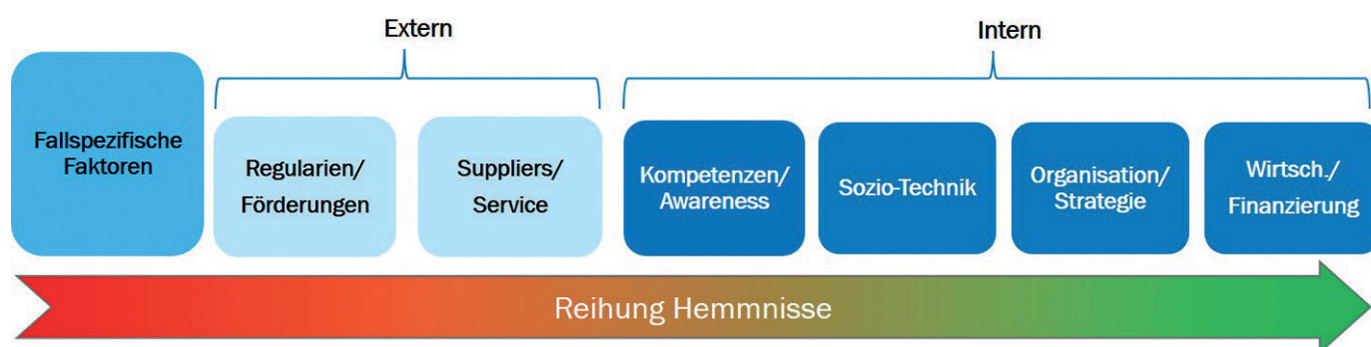


Abb. 3: Darstellung der identifizierten Hemmnisse nach Relevanz

- [11] M. Schulze, H. Nehler, M. Ottosson, P. Thollander: Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework; *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), S. 3692–3708
- [12] S. Löbbe, W. König, S. M. Büttner, C. Schneider: Entscheidung für Energieeffizienz: Auswirkungen von Kultur, Verhalten und Technikdiffusion in produzierenden KMU in Baden-Württemberg; Hochschule Reutlingen, 2019; DOI: <https://doi.org/10.34645/opus-2093>
- [13] N. N.: Empirische Untersuchung des Marktes für Energiedienstleistungen, Energieaudits und andere Energieeffizienzmaßnahmen im Jahr 2018; *Endbericht 2018 – BfEE 17/2017*; www.bfee-online.de/SharedDocs/Downloads/BfEE/DE/Energiedienstleistungen/markterhebung2018.pdf
- [14] F. Otto, J. Otte; in A. Raatz: Untersuchung der Marktchance, Hemmnisse und Systemoptionen für Stromerzeugende Heizungen vor dem Hintergrund neuer nationaler und internationaler technischer Entwicklungen im Bereich der Kleins-BHKW im Hinblick auf zukünftig anstehende Neu- und Umstrukturierung der deutschen Stromversorgung; Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [15] Udo Sievers: Galvanoflex – stromoptimierte, flexible und residuallastangepasste KWK für die Betriebe der Galvanotechnik und vergleichbarer Branchen; *WOMag 8/2017*; www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2017/08/20_eiffo_galvanoflex_08j2017/20_eiffo_galvanoflex_08j2017.php